«La fantascienza di oggi è spesso la scienza di domani.»

Lawrence M. Krauss

La fisica di Star Trek

Prefazione di Stephen Hawking

Nuova edizione aggiornata

LA FISICA DI STAR TREK

di *Lawrence M. Krauss*
Titolo originale: The Physics of Star Trek

TEA – Tascabili degli Editori Associati S.p.A.,
Milano Gruppo editoriale Mauri Spagnol

La precedente edizione italiana di questo volume è stata pubblicata per la prima volta da Longanesi nel 1996. Alla stesura di questo libro non hanno partecipato in alcun modo enti o persone legati alla creazione o alla produzione delle serie televisive Star Trek e dei film a esse ispirati.

Prima edizione TEA Scienze aprile 2000
Quarta edizione TEA Scienze settembre 2006
Nuova edizione TEA Saggistica ottobre 2000

LA FISICA DI STAR TREK

Alla mia famiglia

“*Non si possono cambiare le leggi della fisica!*”
Scott a Kirk, innumerevoli volte

Premessa

di Stephen Hawking

La decisione del comandante Data di invitare Newton, Einstein e me a una partita di poker a bordo dell'*Enterprise* mi fece molto piacere. Finalmente avevo una possibilità di mettere alle strette i due grandi scienziati della gravità, e in particolare Einstein, che non credeva nella probabilità e che negava che Dio giochi a dadi. Purtroppo non potei mai incassare le mie vincite perché la partita fu interrotta a causa di un allarme rosso. In seguito mi misi in contatto con la Paramount per cambiare i miei gettoni, ma non conoscevano il tasso di cambio.

La fantascienza come *Star Trek* non è solo un buon divertimento, ma assolve anche uno scopo serio, che è quello di espandere l'immaginazione umana. Non siamo ancora in grado di arrivare là dove nessuno è mai giunto prima, ma almeno possiamo farlo mentalmente. Possiamo esplorare come lo spirito umano potrebbe rispondere a futuri sviluppi nella scienza e possiamo fare congetture su come potrebbero essere quegli sviluppi. Tra fantascienza e scienza ci sono scambi in entrambi i sensi. La fantascienza suggerisce idee che gli scienziati possono includere nelle loro teorie, ma a volte la scienza scopre nozioni più strane di qualsiasi invenzione della fantascienza. Ne sono un esempio i buchi neri, la cui fortuna deve molto al nome azzeccato che diede loro il fisico John Archibald Wheeler. Se si fosse continuato a chiamarli con i nomi iniziali di «stelle congelate» o di «oggetti completamente collassati», si sarebbe scritto molto meno su di essi.

Una cosa su cui *Star Trek* e altre opere di fantascienza hanno richiamato l'attenzione sono i viaggi a velocità superiore a quella della luce. Questa possibilità è assolutamente essenziale per le storie di *Star Trek.* Se l'*Enterprise* viaggiasse a una velocità anche solo di poco inferiore a quella della luce.

Il viaggio al centro della Galassia r ritorno durerebbe per il suo equipaggio solo qualche anno, ma sulla Terra prima del ritorno dell'astronave passerebbero ben 80.000 anni. Non varrebbe la pena di correre tanto per tornare a rivedere la propria famiglia!

Per fortuna la teoria della relatività generale di Einstein permette di aggirare questa difficoltà: si potrebbe distorcere lo spazio-tempo, creando una scorciatoia fra i luoghi di partenza e d'arrivo. Benché ci siano problemi di energia negativa, tale distorsione potrebbe essere fra le nostre capacità future. Non ci sono state però molte ricerche serie su queste linee, anche perché sembrano forse troppo fantascientifiche. Fra le conseguenze dei viaggi interstellari superveloci potrebbe esserci quella di viaggiare anche a ritroso nel tempo. Immaginate le proteste sullo spreco del denaro dei contribuenti se si venisse a sapere che la National Science Foundation finanzia ricerche sui viaggi nel tempo. Perciò gli scienziati che lavorano in questo campo devono occultare i loro veri interessi usando espressioni tecniche come «curve chiuse di tipo tempo», che sono un nome in codice per i viaggi nel tempo. Ma la fantascienza di oggi è spesso la scienza di domani. La fisica di *Star Trek* merita certamente di essere investigata. Limitare la nostra attenzione a questioni terrestri equivarrebbe a fissare dei confini allo spirito umano.

Prefazione

PERCHÉ la fisica di *Star Trek?* La creazione di Gene Roddenberry, dopo tutto, è fantascienza, non scienza. Molte fra le meraviglie tecniche che compaiono nella serie televisiva poggiano inevitabilmente su nozioni che possono essere mal definite o in contrasto con la nostra comprensione attuale dell'universo. Io non volevo scrivere un libro che finisse semplicemente col segnalare gli errori degli autori di *Star Trek.*

Eppure non riuscivo a togliermi dalla testa l'idea di scrivere questo libro. Confesso che la cosa che mi attirava di più era il teletrasporto. Riflettendo sulle difficoltà che si dovrebbero affrontare per progettare una tale fantastica tecnologia si è costretti a meditare su argomenti che spaziano dai computer e dalla superstrada dell'informazione alla fisica delle particelle, alla meccanica quantistica, all'energia nucleare, alla costruzione di telescopi, alla complessità biologica e persino alla possibile esistenza dell'anima umana! Se si combina tutto questo con idee come quelle dei viaggi straordinari permessi dalla curvatura dello spazio e del tempo, l'attrazione dell'argomento diventa irresistibile.

Ben presto mi resi conto che quel che rendeva il progetto così affascinante per me era qualcosa di simile a ciò che, a quasi trent'anni di distanza dall'inizio della prima serie, continua ad attrarre sempre nuovi appassionati verso *Star Trek.* Questo è, come si espresse l'onnipotente istrione di *Star Trek* Q, il fatto di poter «accertare le possibilità di esistenza ignote». E, come Q avrebbe sicuramente convenuto, immaginarle è ancora più divertente.

Come dice Stephen Hawking nella Premessa, la fantascienza come *Star Trek* aiuta a espandere l'immaginazione umana. Nelle continue meraviglie di *Star Trek* ha in effetti un posto centrale l'esplorazione delle infinite possibilità del futuro, compreso un mondo in cui l'umanità avrà superato le sue miopi tensioni internazionali e razziali e si sarà avventurata a esplorare in pace lo spazio. E, poiché io vedo queste esplorazioni come strettamente connesse alle continue meraviglie della fisica moderna, ho deciso di concentrarmi qui proprio su queste possibilità.

Da un sondaggio informale che ho fatto l'altro giorno mentre camminavo nel campus della mia università, il numero degli americani che non riconoscono la frase «*Beam me up, Scotty*» (Signor Scott, mi faccia risalire) è paragonabile a quello delle persone che non hanno mai sentito menzionare il ketchup. Se consideriamo che la mostra sull'astronave *Enterprise,* tenuta nello *Air and Space Museum* della *Smithsonian Institution*, è stata quella che ha avuto il maggior numero di spettatori – superando di gran lunga il successo delle esposizioni dei veicoli spaziali veri –, penso sia chiaro che *Star Trek* è un veicolo naturale per la curiosità sull'universo di molte persone. Quale contesto migliore si potrebbe quindi desiderare per presentare al pubblico alcune fra le idee più notevoli della fisica di oggi e qualche anticipazione della fisica di domani? Spero che i lettori trovino questo viaggio così divertente come l'ho trovato io.

Lunga vita e prosperità.

Prefazione all'edizione aggiornata

QUANDO, quasi tredici anni fa, cominciai a scrivere *La fisica di Star Trek,* non avevo idea della misura in cui questo libro avrebbe cambiato la mia vita, né dell'influenza che avrebbe potuto avere, sui *trekker* come sui *non-trekker.* Il massimo che potevo sperare era che, dopo la pubblicazione, una folla di fanatici infuriati non si lanciasse contro di me per linciarmi, e che i miei colleghi fisici continuassero a rivolgermi la parola.

Non occorre dire che le mie preoccupazioni si rivelarono infondate. In effetti la reazione generale, immediata e travolgente, fu il contrario di quel che mi attendevo. Una delle prime lettere che ricevetti dopo la pubblicazione del libro fu quella di un appassionato di *Star Trek* che scriveva: «Ho aspettato vent'anni per trovare un libro su Star Trek nel settore dei libri scientifici di una libreria!» E quando cominciai a tenere conferenze su questo argomento mi imbattei in ragazzini di sette e otto anni che avevano letto con attenzione il libro, come dimostravano le pagine piegate negli angoli per ritrovare facilmente i luoghi controversi, e che avevano grandi domande da farmi. E alcuni colleghi rimasero molto sorpresi nel vedere che un libro di fisica potesse diventare un grande bestseller. E, guarda guarda, il libro parve creare un nuovo genere di libri appartenenti a un filone del tutto nuovo, con titoli come *La scienza di…*[1] All'inizio uscirono una quantità di libri intitolati in inglese *The… of Star Trek,* che studiavano ciascuno *Star Trek* dall'angolo visuale di una scienza o disciplina particolare[2]. Seguirono poi numerosi altri libri che seguivano lo stesso schema, come *The Physics of Christmas* e *The Science of Harry Potter*[3].

E riuscii persino a mettermi al timone dell'*Enterprise* negli *studios* della Paramount, pur non potendo partecipare a una partita a poker con Einstein; filmai inoltre un documentario per la televisione col capitano Kirk e bazzicai con personaggi del livello del comandante Riker e del Ferengi Quark.

Poco tempo dopo la pubblicazione del libro, qualcuno cominciò a chiedermi un seguito[4], e la richiesta è stata poi ripetuta numerose volte nel corso degli anni, ma io decisi che avevo già detto tutto quello che volevo dire sull'argomento. Beh, quasi tutto quel che avevo da dire. Negli anni passati da allora non è solo continuata l'epopea di *Star Trek*, ma anche il mondo della scienza ha fatto grandi passi avanti, e io mi azzarderei a dire che la scienza abbia progredito più di *Star Trek*. Nel tentativo di aggiornare la scienza in questa nuova edizione del libro, ho deciso di rivederne l'intero contenuto, aggiungendo nuove informazioni dov'era necessario ed eliminando argomentazioni di cui la natura ha nel frattempo dimostrato l'erroneità.

Ovviamente, nel corso di questo lavoro, non ho resistito alla tentazione di aggiungere qualche nuovo riferimento a episodi di *Star Trek*, e anche di segnalare qualche nuovo errore scientifico, come quello che mi fece notare a una mia conferenza un bambino di cinque anni e quello che mi fu riferito da un membro dell'equipaggio dell'*Enterprise.* Mi sono sforzato di conservare il carattere del libro originale, gran parte del quale è per fortuna sopravvissuto intatto. Arrivato in fondo, spero che i lettori continuino ad apprezzare le argomentazioni del libro e rimangano affascinati dal fatto che, per quanto l'universo di Star Trek possa essere stupefacente, il vero universo continui a riservare sorprese più grandiose e più strane di quanto possa inventare qualsiasi sceneggiatore umano.

Lawrence M. Krauss Cleveland, Ohio, 2007

Sezione prima:
una partita di poker cosmica

In cui la fisica degli ammortizzatori inerziali e dei raggi traenti prepara la via al viaggio nel tempo, alla velocità di curvatura, agli scudi deflettori, ai tunnel spaziali e ad altre stranezze dello spazio-tempo.

1. Newton apre la partita

“Dovunque andiate, ci siete.”
Da una targa sull’astronave *Excelsior,*
in Star Trek VI: Rotta verso l’ignoto,
tratto presumibilmente da *Buchamo Banzai*

SEI al timone della nave spaziale *Defiant (NCC-1764),* attualmente in orbita attorno al pianeta Iconia, nei pressi della Zona Neutrale. Devi incontrarti con una nave di rifornimenti, all’altro estremo di questo sistema solare, che ti fornirà i componenti necessari per riparare le bobine di energia primarie del teletrasporto, che si sono guastate. Qui non c’è alcun bisogno di raggiungere velocità curvatura; regoli il motore a impulso alla potenza necessaria per viaggiare comodamente a metà della velocità della luce, in modo da arrivare a destinazione in alcune ore, e avere il tempo di aggiornare il giornale di bordo del capitano. Mentre la nave spaziale comincia a uscire dall’orbita, senti tuttavia una forte compressione sul torace. Hai le mani di piombo, e sei incollato al sedile. La tua bocca è irrigidita in una smorfia che ti dà un’espressione malvagia, gli occhi sembrano sul punto di schizzarti dalle orbite, e il sangue che scorre attraverso il tuo corpo si rifiuta di salire alla testa. Lentamente perdi coscienza… e in pochi minuti muori.

Che cos’è accaduto? Non sono i primi segni di una deriva spaziale «interfase» che sta per togliere all’equipaggio il controllo della nave, o un attacco da parte di una nave romulana in precedenza occultata. Sei caduto preda di qualcosa di molto più potente. Gli ingegnosi autori di *Star Trek,* da cui dipendi, non hanno ancora inventato gli ammortizzatori inerziali, che introdurranno un po’ più avanti nella serie. Sei stato sconfitto da qualcosa di così poco esotico come le leggi del moto di Isaac Newton, le primissime cose che può capitarci di dimenticare della fisica delle medie superiori.

Mi pare già di sentire le lagnanze di qualche trekker: «Per favore, lasciamo perdere Newton. Parliamo di cose che mi interessano davvero. Per esempio, “Come funziona il motore di curvatura?”, oppure “Che cos’è il lampo che si vede prima del passaggio alla velocità curvatura: è come un bang sonico?” o ancora “Che cos’è veramente un cristallo di dilitio?”» Tutto quel che posso dire è che alla fine ci arriveremo. I viaggi nell’universo di *Star Trek* implicano alcuni fra i concetti più esotici in fisica. Dovremo però chiarire molte cose diverse prima di poter veramente affrontare il problema più fondamentale su *Star Trek: «*Qualcosa di tutto questo è *davvero* possibile, e in tal caso *come?*»

Per arrivare là dove nessuno è mai giunto prima – in realtà prima ancora di uscire dal Quartier generale della Flotta stellare – dobbiamo affrontare gli stessi problemi di cui Galileo e Newton vennero a capo più di trecento anni fa. Il nostro incentivo principale sarà il desiderio di chiarire il problema veramente cosmico che era al cuore della visione di *Star Trek* di Gene Roddenberry e che, secondo me, rende quest’intero argomento degno di riflessione: «*Che cosa ci permette di immaginare la scienza moderna sul futuro possibile della nostra civiltà?*»

Chiunque abbia mai viaggiato in aereo o su un’automobile veloce conosce la sensazione di essere compresso contro il sedile quando il veicolo accelera da fermo. Questo fenomeno è enormemente più marcato su un’astronave. Le reazioni di fusione nel motore a impulso producono pressioni enormi, causando l’espulsione di gas e radiazione ad alta velocità in direzione opposta a quella del movimento della nave. È questa forza di reazione esercitata sui motori dai gas e dalla radiazione espulsi a far sì che i motori stessi «rinculino» in avanti. Anche l’astronave, essendo fissata ai motori, sarà spinta in avanti. Anche tu, al timone, sarai spinto in avanti, dalla forza del sedile del capitano che si esercita sul tuo corpo. A sua volta, il tuo corpo preme sul sedile.

Ora, ecco il problema. Come un martello spinto a grande velocità verso la tua testa produrrà sul tuo cranio una forza che potrà facilmente essere mortale, così anche il sedile del capitano potrà ucciderti se la forza che applica al tuo corpo sarà troppo grande. I piloti degli aviogetti e la NASA hanno un nome per la forza che si esercita sul tuo corpo mentre sei sottoposto ad accelerazioni elevate (come accade in un aereo o durante un lancio spaziale): la forza *g.* Io posso descrivere questa forza con riferimento al mio mal di schiena. Mentre lavoro alla tastiera del mio computer, sento la pressione sempre presente della sedia del mio ufficio sulle mie natiche: una pressione con cui ho imparato a convivere (potrei tuttavia aggiungere che le mie natiche stanno lentamente reagendo a essa in un modo esteticamente poco pregevole). La forza che si esercita sulle mie natiche è una conseguenza dell’attrazione di gravità, la quale, se avesse mano libera, mi accelererebbe fino al centro della Terra. Quel che impedisce al mio corpo di muoversi di moto accelerato verso il basso – ossia di muoversi in giù oltre la mia sedia – è la forza opposta verso l’alto esercitata dal terreno sull’intelaiatura di cemento e acciaio della mia casa, la quale esercita una forza sulla mia sedia, che a sua volta esercita una forza sulla parte del mio corpo a contatto con essa. Se la Terra avesse una massa doppia di quella che ha, conservando però lo stesso diametro, la pressione che si esercita sulle mie natiche sarebbe grande il doppio. Le forze verso l’alto dovrebbero compensare la forza di gravità con un’intensità doppia.

Nel viaggio spaziale si deve tener conto degli stessi fattori. Se sei seduto sul sedile del capitano e dai l’ordine di

accelerare la nave, devi tener conto della forza con cui il sedile ti spingerà avanti. Se ordini un'accelerazione doppia, la forza che il sedile esercita su di te sarà doppia. Quanto maggiore sarà la velocità, tanto maggiore sarà la spinta che subirai dal sedile. L'unico problema è che niente può resistere al tipo di forza necessaria per accelerare rapidamente fino alla velocità impulso: certamente non il tuo corpo.

Per inciso, questo stesso problema affiora in contesti diversi in tutta la serie di *Star Trek,* perfino sulla Terra. All'inizio di *Star Trek V: L'ultima frontiera,* James Kirk sta facendo una scalata mentre è in vacanza a Yosemite, quando scivola e cade. Spock, che calzava i suoi stivali a razzi, accorre in suo soccorso riuscendo ad afferrare il capitano poco prima che si sfracelli al suolo. Purtroppo, questo è un caso in cui la soluzione non risolve niente. Quello che può ucciderti è il fatto di fermarti bruscamente su una distanza così piccola, e non fa molta differenza che a fermarti sia il suolo o la ferrea presa del vulcaniano Spock.

Molto prima che possano farsi sentire in tutta la loro efficacia le forze di reazione che lacereranno o spezzeranno il tuo corpo, entrano in gioco altri gravi problemi fisiologici. Innanzitutto il tuo cuore non riesce più a pompare con forza sufficiente per irrorare il tuo cervello. Ecco perché i piloti di caccia perdono a volte coscienza mentre compiono manovre implicanti rapide accelerazioni. Sono state perciò create tute speciali per forzare il sangue a salire dalle gambe dei piloti, allo scopo di mantenerli coscienti durante l'accelerazione. Questa reazione fisiologica rimane uno dei fattori limitanti quando si deve stabilire l'accelerazione massima possibile dei veicoli spaziali attuali; ecco perché la NASA, diversamente da Jules Verne nel classico romanzo *Dalla Terra alla Luna,* non ha mai lanciato tre uomini in orbita usando un cannone gigantesco.

Se io voglio accelerare me stesso a partire dallo stato di quiete, per esempio fino a 150.000 km/sec, ossia fino a circa metà della velocità della luce, devo farlo in modo graduale, così che nel corso di questo processo il mio corpo non venga fatto a pezzi. Per non essere spinto contro il mio sedile con una forza maggiore di 3 *g,* la mia accelerazione non dev'essere superiore al triplo dell'accelerazione verso il basso di oggetti in caduta libera sulla Terra. Con quest'accelerazione, si richiederebbero circa 5 milioni di secondi, ossia press'a poco due mesi e mezzo, per raggiungere la metà della velocità della luce! Un episodio di *Star Trek* in cui si applicasse quest'accelerazione non ci offrirebbe grandi emozioni.

Per risolvere questo problema, qualche tempo dopo la costruzione della prima nave stellare della Constitution Class – l'*Enterprise (NCC-1701)* – gli autori di *Star Trek* dovettero sviluppare una risposta alla critica che le accelerazioni a bordo di un'astronave avrebbero trasformato istantaneamente l'equipaggio in una «densa salsa»[5]. Essi escogitarono allora gli «ammortizzatori inerziali», un ingegnoso espediente per aggirare questo spinoso piccolo problema. (In effetti, pare che un intero secolo prima la nave stellare *Enterprise* di Classe NX, comandata dal capitano Jonathan Archer, fosse già dotala di ammortizzatori inerziali. Purtroppo, benché questa nave fosse stata costruita molto tempo prima secondo la cronologia interna di *Star Trek,* fu creata dagli autori di *Star Trek* molto tempo dopo secondo i tempi di produzione delle serie.) Gli ammortizzatori inerziali si fanno notare particolarmente quando mancano. Per esempio, l'*Enterprise* fu quasi distrutta dopo aver perso il controllo degli ammortizzatori inerziali, quando gli organismi a microchip noti come Naniti, nell'ambito del loro processo evolutivo, cominciarono a nutrirsi della memoria a nuclei magnetici del computer centrale della nave. In effetti, quasi tutte le volte che l'*Enterprise* viene distrutta (di solito in qualche linea temporale alternativa), la distruzione è preceduta da una perdita degli ammortizzatori inerziali. Le conseguenze di una tale perdita di controllo in un Falco da guerra romulano ci hanno fornito una dimostrazione esplicita che i Romulani hanno il sangue verde.

Purtroppo, come per gran parte della tecnologia nell'universo di *Star Trek,* è molto più facile descrivere il problema che gli ammortizzatori inerziali si propongono di risolvere che spiegare esattamente come lo risolvano. La prima legge della fisica di *Star Trek* deve affermare senza dubbio che, quanto più fondamentale è il problema che si deve aggirare, tanto più difficile dev'essere la soluzione richiesta. Se siamo arrivati fin qui, e se possiamo addirittura postulare un futuro di *Star Trek,* significa che la fisica è un campo che costruisce su se stesso. La soluzione di una difficoltà in *Star Trek* deve aggirare non solo qualche problema di fisica ma anche l'intera conoscenza fisica costruita su tali problemi. La fisica progredisce non per rivoluzioni che distruggono tutto ciò che c'è stato prima, ma piuttosto per evoluzioni, che sfruttano il meglio di ciò che si è già compreso. Fra un milione di anni le leggi di Newton saranno ancora vere come lo sono oggi, qualunque cosa possiamo scoprire alle frontiere della scienza. Se lasciamo cadere una palla sulla Terra, essa cadrà sempre. Se io mi siedo davanti alla mia scrivania e continuo a scrivere da qui all'eternità, le mie natiche subiranno sempre le stesse conseguenze.

In ogni caso, sarebbe ingiusto lasciare in sospeso gli ammortizzatori inerziali senza cercare di dare almeno una descrizione concreta di come dovrebbero funzionare. Da quel che ho detto, essi devono creare all'interno di un'astronave un mondo artificiale in cui la forza di reazione che risponde alla forza di accelerazione si cancelli. Gli oggetti all'interno della nave devono essere indotti in virtù di qualche «trucco» ad agire come se non venissero accelerati. Abbiamo visto come l'accelerazione ci dia la stessa sensazione dell'attrazione di gravità. Questa connessione, che fu alla base della teoria della

relatività generale di Einstein, è molto più intima di quanto possa sembrare a prima vista. C'è quindi una sola possibilità per il funzionamento degli ammortizzatori inerziali: creare all'interno dell'astronave un campo gravitazionale artificiale che «attragga» nella direzione opposta a quella della forza di reazione, in tal modo cancellandola.

Quand'anche si accetti questa possibilità, si devono risolvere pure altri problemi pratici. Da un lato, quando si verificano impulsi inattesi gli ammortizzatori inerziali impiegano un certo tempo a entrare in azione. Per esempio, quando l'*Enterprise* fu spinta in un circolo chiuso di causalità dall'urto con la *Bozeman,* che stava emergendo da una distorsione temporale, l'equipaggio fu disseminato per tutto il ponte (ancor prima della rottura nel nocciolo del motore di curvatura e dell'avaria degli ammortizzatori). Ho letto nelle specificazioni tecniche dell'*Enterprise* che il tempo di risposta per gli ammortizzatori inerziali è di circa 60 millisecondi[6]. Per quanto breve possa sembrare, sarebbe un tempo abbastanza lungo da ucciderti se lo stesso ritardo si verificasse durante periodi di accelerazione programmati. Per convincertene, pensa quanto tempo impiega un martello a fracassarti il cranio, o entro quanto tempo ti sfracelleresti al suolo se cadessi da un precipizio a Yosemite. Basti ricordare che una collisione a 15 km all'ora è l'equivalente di andare a sbattere correndo contro un muro di mattoni! Sarebbe meglio che gli ammortizzatori inerziali fossero pronti a rispondere. Più di un trekker che conosco ha notato che, ogni volta che l'*Enterprise* viene colpita, nessuno viene scagliato a una distanza superiore a pochi metri.

Prima di abbandonare il mondo familiare della fisica classica, non posso fare a meno di menzionare un'altra meraviglia tecnologica che deve confrontarsi con le leggi di Newton per poter operare: il raggio traente dell'*Enterprise.* Messo in grande evidenza nel salvataggio della colonia Genoma su Moab IV, quando deviò un frammento di nucleo stellare che stava avvicinandosi, e in un tentativo simile (ma fallito) di salvare Bre'el IV respingendo una luna asteroide nella sua orbita, il raggio traente sembrerebbe qualcosa di semplice - qualcosa di più o meno simile a una corda invisibile – anche se la forza che esercita può essere di un tipo esotico. In effetti, proprio come un robusto cavo, spesso il raggio traente compie con precisione il lavoro di tirare a bordo una navetta, di rimorchiare un'altra nave o di impedire la fuga di una nave nemica. In effetti, prima che la Federazione avesse un accesso universale ai raggi traenti, l'*Enterprise* di Classe NX usava a quanto pare per svolgere quegli stessi compiti un «*grappler*» magnetico[7]. L'unico problema era che, quando si tira qualcosa con una corda, con un *grappler* o con un raggio traente, si dev'essere ancorati al suolo o a qualcos'altro di molto pesante. Chiunque abbia un po' di pratica di pattinaggio sul ghiaccio sa che cosa succede quando si cerca di spingere via qualcuno. In effetti ci si separa, ma a proprie spese. Se non si è saldamente fissati a qualcosa si finisce per scivolare via, vittime impotenti della propria inerzia.

Fu questo stesso principio a indurre il capitano Jean-Luc Picard a ordinare al tenente Riker di disattivare il raggio traente nell'episodio *La battaglia;* Picard sottolineò che la nave che stavano rimorchiando sarebbe stata trasportata oltre l'*Enterprise* dal suo *momentum:* la sua inerzia. Similmente, se l'*Enterprise* avesse tentato di usare il raggio traente per tener lontano la *Stargazer,* la forza risultante avrebbe spinto all'indietro l'*Enterprise* con la stessa efficacia con cui avrebbe spinto in avanti la *Stargazer.*

Questo fenomeno ha già influito in modo vistoso sul lavoro umano nello spazio. Supponiamo, per esempio, che tu sia un astronauta e che ti venga affidato il compito di stringere un bullone sullo Hubble Space Telescope. Se usi, per fare il lavoro, un avvitatore elettrico, devi prepararti a una sgradita sorpresa. Quando, dopo avere bloccato l'avvitatore sul bullone, lo metti in azione, è probabile che non solo il bullone, ma anche tu cominci a ruotare, in quanto lo Hubble Telescope è molto più pesante di te. Quando l'avvitatore applica una forza al bullone, la forza di reazione che tu senti potrebbe far ruotare te molto più facilmente del bullone, soprattutto se il bullone è già abbastanza stretto. Ovviamente, se sei abbastanza fortunato da avere, come gli assassini del cancelliere Gorkon, degli stivali gravitazionali, che ti permettono di fissarti agevolmente a qualsiasi superficie, puoi muoverti con la stessa efficienza con cui sei abituato a muoverti sulla Terra.

Similmente, è facile rendersi conto di che cosa accade se l'*Enterprise* cerca di tirare verso di sé un'altra astronave. A meno che l'*Enterprise* sia molto più pesante, quando viene attivato il raggio traente sarà essa a muoversi verso l'altra astronave, più che l'inverso. È vero anche che nelle profondità dello spazio questa distinzione finisce per rimanere puramente semantica. Non essendoci alcun sistema di riferimento vicino chi può dire chi attrae e chi viene attratto? Se però ci si trova su uno sventurato pianeta come Moab IV, in orbita attorno a una stella ribelle, fa molta differenza se sia l'*Enterprise* a spingere via la stella o la stella a spingere via l'E*nterprise*!

Un trekker mio conoscente sostiene che il modo per aggirare questo problema è già indicato indirettamente in almeno un episodio: se l'*Enterprise* usasse i motori a impulso attivando contemporaneamente il raggio traente, potrebbe, applicando con i motori una forza opposta, compensare il rinculo che subirebbe altrimenti spingendo o tirando qualcosa. Secondo lo stesso trekker, da qualche parte si dice che il raggio traente, per poter operare in modo appropriato, richiede che sia in funzione il motore a impulso. Io non ho mai notato alcuna istruzione di Kirk o di Picard di attivare i motori a impulso

quando si usa il raggio traente. Non penso, in effetti, che, per una società capace di progettare e costruire ammortizzatori inerziali, sia necessario far ricorso a una soluzione così grossolana fondata sulla forza bruta. Ripensando al bisogno di Geordi La Forge di un campo curvatura per tentare di spingere indietro la luna di Bre'el IV, penso che una manipolazione esatta dello spazio e del tempo, anche se attualmente irrealizzabile, funzionerebbe altrettanto bene. Per capire perché, dobbiamo mettere in azione gli ammortizzatori inerziali e accelerare fino al mondo moderno dello spazio e del tempo curvi.

2. Einstein rilancia

“Una giovane donna, detta Bice,
correva più veloce della luce.
Le era quindi abituale l’esperienza
di arrivar prima della sua partenza.”
Anonimo

«Tempo, ultima frontiera»: così, forse, dovrebbe cominciare ogni episodio di *Star Trek.* I viaggi nel tempo dell’*Enterprise* ebbero inizio trent’anni fa, nel classico episodio *Domani è ieri.* (In realtà, alla fine di un episodio precedente, *Al di là del tempo,* l’*Enterprise* era stata sbalzata all’indietro nel tempo per tre giorni, *ma* non si era trattato di un vero viaggio.) La nave era stata ricacciata nel xx secolo in conseguenza di un evento accidentale, un incontro ravvicinato con una «stella nera» (il termine «buco nero» non si era ancora diffuso nella cultura popolare). Oggi ingredienti esotici come tunnel spaziali e «singolarità quantistiche» insaporiscono regolarmente gli episodi di *Star Trek: Voyager* e la serie più recente *Enterprise* fornirono niente meno che una Guerra fredda temporale. Grazie ad Albert Einstein e a coloro che hanno seguito le sue orme, la struttura stessa dello spazio-tempo è intessuta di drammi.

Benché ognuno di noi sia un viaggiatore nel tempo, il pathos cosmico che eleva la storia umana al livello della tragedia ha origine per il fatto che noi sembriamo condannati a viaggiare in una sola direzione: verso il futuro. Che cosa non darebbe ognuno di noi per poter viaggiare nel passato, per rivivere momenti gloriosi, correggere errori, incontrare i propri eroi, e forse perfino scongiurare disastri, o semplicemente per tornare giovane con la saggezza della vecchiaia? La possibilità di viaggiare nello spazio ci attrae ogni volta che alziamo lo sguardo verso le stelle, mentre i viaggi nel tempo ci sembrano preclusi da una condizione che ci imprigiona per sempre nel presente. La domanda che anima non solo licenze fantascientifiche ma anche una quantità sorprendente di ricerche nella moderna fisica teorica può essere formulata in modo molto semplice: noi siamo o non siamo prigionieri su un treno merci temporale cosmico che non può uscire dal suo binario?

Le origini del moderno genere narrativo della fantascienza sono strettamente connesse al problema del viaggio nel tempo. Il classico romanzo di Mark Twain *Un americano alla corte di re Artù* è più un’opera di fantasia che di fantascienza, benché l’intera vicenda ruoti attorno alle avventure vissute da un americano dell’Ottocento nel corso di un viaggio nel tempo nell’Inghilterra medievale. (Forse Mark Twain non si soffermò più di tanto sugli aspetti scientifici del viaggio nel tempo in conseguenza della promessa fatta a Picard, a bordo dell’*Enterprise,* di non parlare del futuro una volta tornato nell’Ottocento: cosa che avvenne saltando attraverso una fessura temporale su Devidia II, nell’episodio *Un mistero dal passato.)* La transizione al paradigma seguito da *Star Trek* fu completata dal notevole romanzo *La macchina del tempo* di H.G. Wells. Questi si era diplomato all’Imperial College of Science and Technology a Londra, e il linguaggio scientifico permea la sue descrizioni, come pure le discussioni dell’equipaggio dell’*Enterprise.*

Fra gli episodi più creativi e appassionanti delle serie di *Star Trek* vi sono senza dubbio quelli che implicano viaggi nel tempo. Nelle prime due serie ho contato non meno di ventidue episodi che si occupano di questo tema, come pure tre dei film di *Star Trek* e vari episodi delle serie *Voyager* e *Deep Space Nine,* che sono apparsi mentre stavo scrivendo queste pagine. L’aspetto forse più affascinante dei viaggi nel tempo in *Star Trek* è che non esiste una possibilità più radicale di violare la Prima Direttiva. Gli equipaggi della Flotta stellare hanno l’ordine di non interferire con il normale sviluppo storico presente di nessuna delle società aliene che visitano. Viaggiando a ritroso nel tempo è possibile addirittura eliminare del tutto il presente. Anzi, è possibile perfino eliminare del tutto la storia!

Sia nella fantascienza sia in fisica troviamo un famoso paradosso: che cosa accadrebbe se, viaggiando nel passato, tu uccidessi tua madre in un tempo anteriore alla tua nascita? Cesseresti di esistere. Ma se cessassi di esistere, non potresti tornare indietro nel tempo e uccidere tua madre. Non uccidendo tua madre, non cesseresti di esistere. In altri termini, se esisti non puoi esistere, ma se non esisti devi esistere.

Ci sono altri interrogativi, meno ovvi ma altrettanto drammatici e imbarazzanti, che affiorano quando si pensa ai viaggi nel tempo. Per esempio, alla fine di *Un mistero dal passato,* Picard manda ingegnosamente un messaggio dall’Ottocento al XXIV secolo; egli introduce informazioni in codice binario nella testa recisa di Data, sapendo che sarà scoperta quasi cinquecento anni dopo e riattaccata al corpo. Lo vediamo introdurre il messaggio, dopo di che la scena si sposta nel XXIV secolo, quando La Forge riesce a riattaccare la testa. Allo spettatore questi eventi sembrano contemporanei, ma non è così; una volta che Picard ha incluso il messaggio nella testa di Data, esso rimane lì inutilizzato per mezzo millennio. Ma se io esaminassi la testa di Data nel XXIV secolo e Picard non avesse ancora compiuto il suo viaggio a ritroso nel tempo per cambiare il futuro, vedrei tale messaggio? Si potrebbe sostenere che, se Picard non ha ancora compiuto il viaggio a ritroso nel tempo, non può esserci stato alcun effetto sulla testa di Data. Eppure le azioni che cambiano la programmazione di Data furono eseguite nell’Ottocento a prescindere dal fatto che Picard abbia o no compiuto il suo viaggio a ritroso nel tempo per eseguirle. Esse sono quindi già avvenute, anche se Picard non ha ancora cominciato il suo viaggio! In questo modo, una

causa nell'Ottocento (l'introduzione dei dati da parte di Picard) può produrre un effetto nel XXIV secolo (mutamento nei circuiti di Data) prima che la causa nel XXIV secolo (l'abbandono della nave da parte di Picard) produca l'effetto nell'Ottocento (l'arrivo di Picard nella caverna in cui si trova la testa di Data) che ha permesso il verificarsi della causa originaria (l'introduzione delle informazioni nella testa a opera di Picard).

In realtà, se questo intreccio può apparire ingarbugliato, non è niente rispetto al massimo fra tutti i paradossi temporali che si verifica nell'episodio finale di *Star Trek: The Next Generation,* quando Picard innesca una catena di eventi che viaggeranno a ritroso nel tempo e distruggeranno non solo i suoi antenati ma tutta la vita sulla Terra. Specificamente, una «distorsione subspaziale del tempo» implicante l'antitempo minaccia di crescere a ritroso nel tempo, inghiottendo infine il protoplasma formato da amminoacidi sulla Terra nascente prima che possano formarsi le prime proteine, che saranno i mattoni per la costruzione della vita. Questo è il caso supremo di un effetto che produce una causa. La distorsione temporale si crea evidentemente nel futuro. Se la distorsione subspaziale del tempo fosse stata in grado di distruggere, nel lontano passato, le prime forme di vita sulla Terra, la vita sul nostro pianeta non si sarebbe mai evoluta fino a creare una civiltà capace di creare tale distorsione nel futuro!

La risoluzione classica di questi paradossi, almeno per molti fisici, consiste nel sostenere a priori che in un universo ragionevole, come quello in cui presumibilmente viviamo, tali possibilità non devono essere permesse. Il problema, però, è che le equazioni della relatività generale di Einstein non solo non proibiscono direttamente tali possibilità, ma le incoraggiano.

A meno di trent'anni di distanza dallo sviluppo delle equazioni della relatività generale, una soluzione esplicita grazie alla quale potrebbero aver luogo i viaggi nel tempo fu sviluppata dal famoso matematico Kurt Godei, che lavorava all'Institute for Advanced Study a Princeton insieme a Einstein. Nel linguaggio di *Star Trek,* questa soluzione permette l'instaurarsi di un «circolo chiuso temporale di causalità», come quello in cui rimane presa l'*Enterprise* dopo essere stata colpita dalla *Bozeman.* La terminologia più arida della fisica moderna parla in proposito di una «curva chiusa di tipo tempo». Nell'un caso come nell'altro, è possibile fare un viaggio di andata e ritorno tornando al punto di partenza non solo nello spazio *ma anche* nel tempo! La soluzione di Godei implica un universo che, diversamente da quello in cui viviamo, non si espande ma ruota di moto uniforme. In un tale universo, si potrebbe in linea di principio andare a ritroso nel tempo semplicemente viaggiando lungo un grande cerchio nello spazio. Benché un tale universo ipotetico sia vistosamente diverso da quello in cui viviamo, il semplice fatto che questa soluzione in generale esista indica chiaramente che nel contesto della relatività generale il viaggio nel tempo è possibile.

C'è una massima sull'universo che ripeto spesso ai miei studenti: ciò che non è proibito esplicitamente, sicuramente avverrà. O, come disse Data nell'episodio *Paralleli,* riferendosi alle leggi della meccanica quantistica, «Tutto ciò che può accadere, accade». Questo è lo spirito con cui ci si dovrebbe secondo me accostare alla fisica di *Star Trek.* Dobbiamo considerare la distinzione non fra ciò che esiste e ciò che non esiste ma fra ciò che è possibile e ciò che non lo è.

Questa nozione non sfuggì, ovviamente, allo stesso Einstein, il quale scrisse: «[La soluzione della macchina del tempo di] Kurt Godei [solleva] il problema [che] mi disturbò già al tempo in cui costruii la teoria della relatività generale, senza riuscire a chiarirlo… Sarà interessante considerare se queste [soluzioni] non debbano essere escluse per ragioni fisiche»[8].

Da allora la sfida per i fisici è sempre stata quella di stabilire se esistano «ragioni fisiche» per escludere la possibilità dei viaggi nel tempo, che la forma delle equazioni della relatività generale sembra preannunciare. La discussione di questi argomenti ci costringerà a viaggiare oltre il mondo classico della relatività generale, in un dominio oscuro in cui la meccanica quantistica deve influire addirittura sulla natura dello spazio e del tempo. Nel corso di questo cammino anche noi, come l'*Enterprise,* ci imbatteremo in buchi neri e in tunnel spaziali. Ma prima dovremo compiere noi stessi un viaggio a ritroso nel tempo fino alla metà dell'Ottocento.

Il connubio di spazio e tempo che annunciò l'èra moderna ebbe inizio con l'unificazione, nel 1864, di elettricità e magnetismo. Questa notevole impresa intellettuale, fondata sugli sforzi cumulati di grandi fisici come André-Marie Ampère, Charles-Augustin de Coulomb e Michael Faraday, fu coronata dal brillante fisico britannico James Clerk Maxwell. Questi scoprì che le leggi dell'elettricità e del magnetismo non solo presentavano un'intima relazione fra loro, ma implicavano congiuntamente l'esistenza di «onde elettromagnetiche», le quali dovrebbero viaggiare nello spazio a una velocità calcolabile sulla base delle proprietà note dell'elettricità e del magnetismo. La velocità risultò essere identica alla velocità della luce, che era già stata misurata precedentemente.

Ora, dal tempo di Newton in poi c'è stata una controversia sul problema se la luce sia un fenomeno ondulatorio – ossia una perturbazione che si propaga in un mezzo di fondo – o corpuscolare, con particelle che si muovono a prescindere dall'esistenza di un mezzo. L'osservazione di Maxwell che le onde elettromagnetiche dovevano esistere e che la loro velocità

era identica a quella della luce mise fine alla controversia: la luce era un'onda elettromagnetica.

Qualsiasi onda è solo una perturbazione che si propaga. Ma se la luce è una perturbazione elettromagnetica, qual è il mezzo che viene perturbato quando l'onda si propaga? Questo divenne l'argomento «caldo» da investigare alla fine dell'Ottocento. Il mezzo proposto ricevette un nome classico, risalente addirittura ad Aristotele. Esso fu chiamato etere. Questo mezzo era sfuggito fino allora a qualsiasi tentativo di rivelazione diretta. Nel 1887, però, Albert A. Michelson ed Edward Morley – attivi in due istituzioni che in seguito, nel 1967, si sarebbero fuse a formare l'università nella quale insegno, la Case Western Reserve University – fecero un esperimento che avrebbe dovuto rivelare non l'etere ma gli effetti dell'etere: se l'etere riempiva tutto lo spazio, la Terra doveva muoversi attraverso di esso. La luce in movimento nell'etere in direzioni diverse rispetto al moto della Terra, doveva mostrare perciò variazioni di velocità. Questo esperimento è stato riconosciuto come uno fra i più significativi dell'Ottocento, anche se Michelson e Morley non riuscirono a osservare l'effetto che stavano cercando. Noi oggi ricordiamo i loro nomi proprio perché *non* riuscirono a osservare gli effetti del moto della Terra attraverso l'etere. (Michelson continuò poi gli esperimenti, e fu il primo americano a ricevere un premio Nobel per la fisica, grazie alle sue ricerche sperimentali sulla velocità della luce, e io sono orgoglioso di occupare oggi la cattedra da lui tenuta più di cent'anni fa. Morley continuò la sua carriera come chimico, determinando, fra l'altro, il peso atomico dell'elio.) La mancata scoperta dell'etere determinò la propagazione di onde d'urto minori nella comunità dei fisici, ma, come accade nel caso di molte scoperte fondamentali, le sue implicazioni furono pienamente apprezzate solo da pochi fisici, che già avevano cominciato a riconoscere vari paradossi associati alla teoria dell'elettromagnetismo. Attorno a quest'epoca cominciò per conto proprio ad affrontare direttamente questi paradossi un giovane studente di nome Albert Einstein, che al tempo dell'esperimento di Michelson e Morley aveva diciotto anni. A ventisei anni, nel 1905, Einstein aveva risolto il problema ma, come spesso avviene quando si fanno grandi balzi in avanti in fisica, i suoi risultati suscitarono più domande che risposte.

La soluzione di Einstein, che forma il cuore della sua teoria della relatività ristretta, si fondava su un fatto semplice ma apparentemente impossibile: la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell poteva essere autoconsistente solo se la velocità osservata della luce era indipendente dalla velocità dell'osservatore relativamente alla luce. Il problema, però, è che questo fatto pone una sfida radicale al senso comune. Se l'*Enterprise* lancia una sonda mentre sta viaggiando alla velocità d'impulso, un osservatore su un pianeta vedrà sfrecciare la sonda a una velocità molto superiore a quella a cui la vedrebbe muoversi un membro dell'equipaggio dell'*Enterprise* che la guardasse da un finestrino. Einstein riconobbe però che la teoria di Maxwell sarebbe autoconsistente solo se le onde luminose si comportassero in modo diverso, ossia se la loro velocità quale viene misurata da entrambi gli osservatori restasse identica, e indipendente dal moto relativo degli osservatori. Così, se io sparo un raggio faser dalla parte frontale dell'*Enterprise,* ed esso si allontana da me alla velocità della luce verso il ponte di un Falco da guerra romulano che si sta avvicinando a una velocità d'impulso di ¾ della velocità della luce, per i Romulani sul ponte della nave nemica il raggio arriverà esattamente alla velocità della luce, e non a 1 ¾ di tale velocità. Questi concetti hanno un po' confuso alcuni trekker, i quali immaginano che, se l'*Enterprise* si muove a una velocità prossima a quella della luce e un'altra astronave si allontana da essa in direzione opposta con una velocità simile, la luce emessa dall'*Enterprise* non raggiungerà mai l'altra nave (la quale perciò non riuscirà a vedere l'*Enterprise* stessa). È vero invece che coloro che si trovano sull'altra astronave vedranno la luce emessa dall'Enterprise avvicinarsi alla velocità della luce.

Non fu solo la consapevolezza di questo fatto a rendere familiare il nome di Einstein; più importante fu la sua disponibilità a esplorare le implicazioni di questa scoperta, che a tutta prima può sembrare assurda. Nella nostra esperienza normale sono il tempo e lo spazio a essere assoluti, mentre la velocità è relativa: la velocità da noi percepita di una cosa dipende dalla velocità con cui noi stessi ci muoviamo. Quando però ci si approssima alla velocità della luce è la velocità a diventare una quantità assoluta, e perciò *devono diventare relativi lo spazio e il tempo!*

Ciò si verifica perché la velocità è definita letteralmente come la distanza percorsa in un qualche tempo specifico. Così l'unico modo in cui un singolo raggio di luce può percorrere in un secondo la stessa distanza – diciamo 300 milioni di metri – relativamente a due osservatori in moto relativo fra loro, è se ciascuno dei loro «secondi» o ciascuno dei loro «metri» è diverso! Risulta così che, nella relatività ristretta, si presenta «il peggiore dei due mondi», ossia che tanto secondi quanto metri diventano quantità relative.

Dal semplice fatto che la velocità della luce, misurata, risulta essere la stessa per tutti gli osservatori, quale che sia il loro moto relativo, Einstein ottenne le quattro conseguenze seguenti per spazio, tempo e materia:

a) gli eventi che accadono *nello stesso tempo in due luoghi diversi* per un osservatore non sono necessariamente simultanei per un altro osservatore in moto rispetto al primo. *L'«ora» di una persona vale esclusivamente per tale persona. «Prima» e «dopo», applicati a eventi distanti, sono concetti relativi.*

b) Tutti gli orologi su astronavi in movimento rispetto a me mi sembreranno più lenti del mio orologio. *Per oggetti in moto il tempo misurato risulta rallentarsi.*

c) Tutti i regoli per la misura delle lunghezze su astronavi in movimento rispetto a me mi appariranno più corti di quanto mi apparirebbero se si trovassero in quiete nel mio sistema di riferimento. *Gli oggetti, comprese le navi spaziali, misurati mentre sono in movimento risultano contrarsi.*

d) Tutti gli oggetti dotati di massa diventano tanto più pesanti quanto più elevata è la loro velocità. Mentre si approssimano alla velocità della luce, il loro peso tende all'infinito. *Perciò solo oggetti privi di massa, come la luce, possono muoversi alla velocità della luce.*

Non è questo il luogo per passare in rassegna tutti i mirabili paradossi apparenti che la relatività introduce nel mondo. Basti dire che, ci piaccia o no, le conseguenze di (a)-(d) sono vere, ossia sono state verificate. Orologi atomici trasportati in alta quota da aerei molto veloci sono rimasti indietro rispetto a orologi identici di controllo rimasti a terra. In laboratori di fisica delle alte energie in tutto il mondo le conseguenze della teoria ristretta della relatività sono pane quotidiano per gli sperimentatori. Particelle elementari instabili vengono accelerate fino a velocità prossime a quella della luce, e la loro vita media, misurata, risulta accresciuta di fattori enormi. Quando gli elettroni, che in quiete hanno una massa 2000 volte inferiore a quella dei protoni, vengono accelerati a velocità prossime a quella della luce, vengono ad avere una quantità di moto equivalente a quello dei loro cugini più pesanti. In effetti, un elettrone accelerato a 0,99999999999999999999999999999999999999999999999999 volte la velocità della luce ci colpirebbe con lo stesso impatto di un autocarro che viaggiasse a una velocità normale.

La ragione per cui troviamo così difficile accettare alla lettera tutte queste implicazioni della relatività dello spazio e del tempo è che tutti i movimenti che facciamo e osserviamo nel nostro mondo hanno velocità molto inferiori a quella della luce. Ognuno degli effetti citati sopra diventa sensibile solo quando ci si muove a velocità «relativistiche». Per esempio, anche a una velocità pari a metà di quella della luce, gli orologi rallenterebbero e i regoli si contrarrebbero del 15 per cento. Su uno *shuttle* della NASA, che si muove attorno alla Terra alla velocità di circa 8 km al secondo, gli orologi rallentano di meno di un decimilionesimo dell'un per cento rispetto a orologi uguali rimasti sulla Terra.

Nel mondo ad alta velocità dell'*Enterprise* o di qualsiasi altra astronave, ci si dovrebbe invece confrontare quotidianamente con la relatività. È facile immaginare quali problemi debba affrontare una Federazione di civiltà galattiche per sincronizzare gli orologi in gran parte di una galassia, quando molti di essi si muovono a velocità prossime a quella della luce. Di conseguenza la Flotta stellare ha a quanto pare la regola che le normali operazioni a impulso per le navi spaziali siano limitate a una velocità di 0,25 c, ossia un quarto della velocità della luce, pari a soli 75.000 km/sec.[9]

Nonostante questa regola, gli orologi sulle astronavi in moto a questa velocità presenteranno un rallentamento di un po' più del 3 per cento rispetto agli orologi del Comando della Flotta stellare. Ciò significa che in un mese di viaggio gli orologi rimarranno indietro di quasi un giorno. Se l'*Enterprise* dovesse tornare al Comando della Flotta dopo un viaggio del genere, sulla nave spaziale sarebbe venerdì, mentre alla base sarebbe già sabato. L'inconveniente non sarebbe più grave di quello di cambiare la data sugli orologi dopo avere attraversato la linea internazionale del cambiamento di data quando si viaggia verso oriente, ma con la differenza che in questo caso l'equipaggio, di ritorno da un viaggio interstellare, sarebbe *effettivamente* più giovane di un giorno, mentre in un viaggio sulla Terra si guadagna un giorno andando in una direzione e si perde un giorno viaggiando nell'altra.

Si può vedere ora quanto sia importante il motore di curvatura per l'*Enterprise.* Esso è progettato non solo per aggirare il limite ultimo di velocità – la velocità della luce – e per permettere di viaggiare effettivamente nella Galassia, ma anche per evitare i problemi della dilatazione del tempo che si hanno quando la nave viaggia a una velocità prossima a quella della luce.

Non potrò mai sottolineare abbastanza l'importanza di questi fatti. Alcuni autori di fantascienza (e tutti coloro che hanno sognato di poter viaggiare fino ad altre stelle) hanno pensato che il rallentamento degli orologi quando ci si approssima alla velocità della luce offra una possibilità di percorrere le immense distanze interstellari nell'arco di una vita umana, almeno della vita di coloro che fanno parte dell'equipaggio. Viaggiando a una velocità vicina a quella della luce, un viaggio, per esempio, fino al centro della nostra Galassia richiederebbe più di 25.000 anni terrestri. Per l'equipaggio il viaggio potrebbe richiedere meno di 10 anni: un viaggio lungo ma non impossibile. Pur rendendo realizzabili singoli viaggi di scoperta, questa prospettiva renderebbe tuttavia impossibile il compito di dirigere una Federazione di civiltà disseminate nella Galassia. Come hanno correttamente sospettato gli autori di *Star Trek,* il fatto che un viaggio della durata di 10 anni per l'*Enterprise* corrisponda a un periodo di 25.000 anni per il Comando della Flotta stellare creerebbe sconquassi per qualsiasi tentativo del comando di organizzare e controllare gli spostamenti di molti di tali veicoli spaziali. E quindi assolutamente essenziale a) che si eviti la velocità della luce, per non desincronizzare la Federazione *e* b) che si realizzi una velocità maggiore di quella della luce, per poter effettivamente viaggiare nella Galassia.

Il guaio è che, nel contesto della sola relatività ristretta, la seconda possibilità *è irrealizzabile.* Se si ammette una velocità

superiore a quella della luce la fisica diventa piena di cose impossibili. Uno fra i problemi più importanti è il fatto che, poiché all'approssimarsi alla velocità della luce la massa degli oggetti tende all'infinito, si richiederà una quantità di energia sempre maggiore per accelerarli di una quantità sempre più piccola. Come nel mito dell'eroe greco Sisifo, che fu condannato a spingere un masso su per un pendio per tutta l'eternità, vedendo i suoi sforzi frustrati ogni volta che si avvicinava alla cima, tutta l'energia dell'universo non sarebbe sufficiente a permetterci di spingere neppure un granello di polvere, e tanto meno un'astronave, oltre questa suprema velocità limite.

Similmente, non solo la luce ma qualsiasi forma di radiazione priva di massa *deve* propagarsi alla velocità della luce. Ciò significa che i molti tipi di esseri di «energia pura» incontrati dall'*Enterprise,* e in seguito dal *Voyager,* avrebbero difficoltà a esistere come ci vengono presentati. In primo luogo non potrebbero star fermi. La luce non può essere rallentata, e tanto meno fermata nello spazio vuoto. In secondo luogo, qualsiasi forma di essere intelligente fatto di energia (come gli esseri di energia «fotonica» nella serie *Voyager,* gli esseri di energia nella nube Beta Renna in *The Next Generation,* gli Zetariani nella serie originale, e il Dal'Rok, in *Deep Space Nine,* che è costretto a viaggiare alla velocità della luce), avrebbe orologi infinitamente rallentati rispetto al nostro. L'intera storia dell'universo passerebbe in un singolo istante. Se esseri fatti di energia fossero in grado di sperimentare qualcosa, sperimenterebbero tutto simultaneamente! Non occorre dire che, prima che essi potessero effettivamente interagire con esseri corporei, questi sarebbero morti da molto tempo.

Parlando di tempo, penso che sia venuto il momento di parlare della Manovra di Picard. Jean-Luc divenne famoso per avere introdotto questa tattica mentre era a bordo dello *Stargazer.* Pur implicando la velocità curvatura, ossia una velocità superiore a quella della luce – di cui abbiamo visto l'impossibilità nel contesto della sola relatività ristretta – la manovra fa ricorso a essa solo per un istante e ben si concilia con le discussioni condotte finora. Nella Manovra di Picard, eseguita per confondere una nave nemica che attacca, si accelera per un istante la propria astronave a velocità curvatura. In conseguenza di ciò, essa sembra quindi trovarsi al tempo stesso in due luoghi. Questo perché, viaggiando per un istante a una velocità superiore a quella della luce, *sopravanza* i raggi di luce che ha emesso nell'istante prima di aver iniziato la propulsione a velocità curvatura. Pur essendo una strategia perspicace – e pur sembrando del tutto coerente (ignorando il problema se sia o no possibile raggiungere la velocità curvatura) – penso che possiate rendervi conto che essa apre un vero vaso di Pandora pullulante di difficoltà. In primo luogo aggira un problema che è stato sollevato nel corso degli anni da molti trekker: come può il personale dell'*Enterprise* nella sala comando «vedere» oggetti che si avvicinano a velocità curvatura? Come lo *Stargazer* sopravanzò la propria immagine, così faranno tutti gli oggetti che si muovono a velocità curvatura; non si dovrebbe quindi poter vedere l'immagine in movimento di un oggetto a velocità curvatura fino a molto tempo dopo il suo arrivo. Si può supporre solo che, quando Kirk, Picard o Janeway ordinano di far apparire un'immagine sullo schermo, quella che si vede sia un'immagine composita formata per mezzo di informazioni inviate da un qualche tipo di sensori del «subspazio» (ossia di comunicazioni a velocità superiore a quella della luce) a lungo raggio d'azione. Anche ignorando questa evidente svista, l'universo di *Star Trek* sarebbe un universo interessante e a stento navigabile, pieno di immagini fantasma di oggetti arrivati già da molto tempo nei luoghi verso cui stavano andando a velocità curvatura.

Tornando al mondo delle velocità inferiori a quella della luce, non abbiamo ancora finito con Einstein. La sua famosa relazione fra massa ed energia, $E = mc^2$, che è una conseguenza della relatività ristretta, presenta un'ulteriore difficoltà al viaggio spaziale a velocità d'impulso. Come abbiamo visto nel capitolo 1, un razzo è un dispositivo che, per muoversi in avanti, deve spingere dei materiali all'indietro. Come si può immaginare, quanto più rapidamente il materiale è espulso all'indietro, tanto maggiore sarà l'impulso in avanti ricevuto dal razzo. Nessun materiale può essere espulso con una velocità superiore a quella della luce. Ma anche dargli la velocità della luce non è certo facile: l'unico modo per far muovere all'indietro il propellente alla velocità della luce è di alimentare il razzo con materia e antimateria, le quali (come vedremo in un altro capitolo) possono annichilarsi completamente e produrre radiazione pura in movimento alla velocità della luce.

Ma mentre il motore di curvatura dell'*Enterprise* usa tale propellente, non lo usa il motore a impulso. Esso è alimentato invece dalla fusione nucleare: la stessa fusione nucleare che opera nel Sole trasformando l'idrogeno in elio. Nelle reazioni a fusione viene convertita in energia l'un per cento circa della massa a disposizione. Con quest'energia facilmente disponibile, gli atomi di elio che vengono prodotti possono uscire dagli ugelli del razzo a una velocità pari a ⅛ circa della velocità della luce. Usando questa velocità per i prodotti di scarico, possiamo quindi calcolare la quantità di propellente di cui l'*Enterprise* ha bisogno per accelerare, diciamo, fino alla metà della velocità della luce. Il calcolo non è difficile, ma io mi limiterò qui a dare la soluzione. Questa potrebbe essere una sorpresa per voi. Ogni volta che l'*Enterprise* accelera fino a tale velocità, deve bruciare una massa di idrogeno pari a *81 volte la sua intera massa.* Dato che una nave spaziale di classe Galaxy come l'*EnterpriseD* di Picard ha un peso superiore a 4 milioni di tonnellate[10], ciò significa che, ogni volta che si usa il motore a

impulso per accelerare la nave spaziale fino a raggiungere la metà della velocità della luce, si devono consumare più di 300 milioni di tonnellate di idrogeno! Se, per il motore a impulso, si usasse invece un sistema di propulsione a materia-antimateria, le cose andrebbero un pochino meglio. In questo caso, infatti, per accelerare la nave spaziale fino a tale velocità, si consumerebbe una quantità di propellente pari a solo *due volte* la massa dell'*Enterprise.*

Ma c'è di peggio. Il calcolo che ho descritto vale infatti per una sola accelerazione. Per fermare la nave spaziale, una volta che essa sia arrivata a destinazione, si deve consumare una quantità di propellente pari di nuovo allo stesso fattore di 81 volte la sua massa. Ciò significa che solo per andare da I qualche parte alla metà della velocità della luce e fermarsi una volta arrivati al termine del viaggio si richiederebbe una quantità di propellente pari a 81 x (massa della nave più il propellente trasportato per fermare la nave al termine del viaggio di andata) = 81 x 82 = 6642 volte l'intera massa dell'astronave! Supponiamo, inoltre, che si voglia raggiungere l'accelerazione a metà della velocità della luce in alcune ore (supporremo, ovviamente, che gli ammortizzatori inerziali stiano svolgendo con perfetta efficienza il loro compito di proteggere l'equipaggio e la nave dalle tremende forze gravitazionali che altrimenti ne seguirebbero). La potenza erogata dai motori per la propulsione sarebbe allora di circa 10^{22} watt, ossia un miliardo di volte circa la potenza media totale attualmente prodotta e usata da tutte le attività umane sulla Terra!

Ora, qualcuno potrebbe suggerire (come ha fatto qualche giorno fa un mio brillante collega quando gli ho spiegato questo ragionamento) una sottile scappatoia. Il ragionamento si basa sull'assunto che la nave spaziale porti con sé durante il viaggio tutto il propellente occorrente. E se, invece, lo raccogliesse durante il viaggio? Dopo tutto, l'idrogeno è l'elemento più abbondante nell'universo. Non lo si potrebbe raccattare durante il viaggio nella Galassia? Consideriamo che la densità media della materia nella nostra Galassia è di circa un atomo di idrogeno per centimetro cubico. Per raccogliere solo un grammo di idrogeno al secondo, anche muovendosi a una velocità pari a una buona frazione della velocità della luce, si dovrebbero usare pannelli di raccolta del diametro di più di 40 chilometri. E anche trasformando tutta questa materia in energia per la propulsione si otterrebbe solo un centomilionesimo della potenza di propulsione richiesta!

Per parafrasare le parole del fisico premio Nobel Edward Purcell, di cui ho qui adattato ed esteso le argomentazioni: se questo ragionamento vi sembra assurdo, avete ragione. La sua assurdità deriva dalle leggi elementari della meccanica classica e della relatività ristretta. Gli argomenti presentati qui sono ineluttabili come il fatto che una palla, lasciata libera, cadrà sulla superficie della Terra. Il viaggio spaziale attraverso la Galassia con propulsione a razzo a una velocità prossima a quella della luce *non è fisicamente pratico,* né ora né mai!

Che cosa devo fare, dunque? Terminare il libro a questo punto? Rimandare al mittente tutte le meraviglie di *Star Trek* e chiedere un risarcimento? Beh, non abbiamo ancora finito con Einstein. Dopo tutto la sua ultima scoperta, forse la più grande, autorizza un barlume di speranza.

Torniamo rapidamente al 1908: la scoperta della relatività dello spazio e del tempo da parte di Einstein annuncia una di quelle esperienze «aha!» che ogni tanto vengono a modificare radicalmente la nostra immagine dell'universo. Fu nell'autunno del 1908 che il fisico matematico Hermann Minkowski scrisse queste famose parole: «D'ora in poi lo spazio preso a sé, e il tempo preso a sé, sono condannati a trasformarsi in semplici ombre, e solo una sorta di loro unione potrà conservare una realtà indipendente».

Ciò di cui Minkowski si rese conto è che, benché spazio e tempo siano relativi per osservatori in moto relativo – il tuo orologio potrà rallentare rispetto al mio e le distanze misurate da me potranno essere diverse da quelle misurate da te –, se spazio e tempo vengono fusi assieme come parte di un tutto quadridimensionale (tre dimensioni dello spazio e una del tempo), riappare d'improvviso una realtà obiettiva «assoluta».

Il grande balzo di immaginazione di Minkowski può essere spiegato facendo riferimento a un mondo in cui ognuno abbia una visione monoculare e manchi quindi di una percezione diretta della profondità. Se tu chiudi un occhio e io ti mostro un righello, e poi dico di chiudere un occhio anche a un'altra persona che osserva il righello da un'altra angolazione, il righello appare di lunghezza diversa ai due osservatori, come mostra la seguente immagine della scena vista dall'alto (figura 1).

Ognuno dei due osservatori, non essendo in grado di discernere direttamente la profondità, chiamerà «lunghezza» (L o L') la proiezione bidimensionale della reale lunghezza tridimensionale del righello sul suo piano visivo. Noi, sapendo che lo spazio ha tre dimensioni, non ci lasciamo ingannare da questa situazione. Sappiamo infatti che un oggetto, osservato da un angolo diverso, non cambia per questo la sua lunghezza reale, anche se cambia la sua lunghezza apparente. Minkowski mostrò che la stessa idea può spiegare i vari paradossi della relatività: basta supporre che la nostra percezione dello spazio sia semplicemente una sezione tridimensionale di quella che in realtà è una varietà quadridimensionale in cui spazio e tempo sono fusi insieme. Due diversi osservatori in moto relativo fra loro percepiscono due sezioni tridimensionali *diverse* del

sottostante spazio quadridimensionale, in modo molto simile a quello in cui i due osservatori presentati nella figura vedono due sezioni bidimensionali *diverse* di uno spazio tridimensionale.

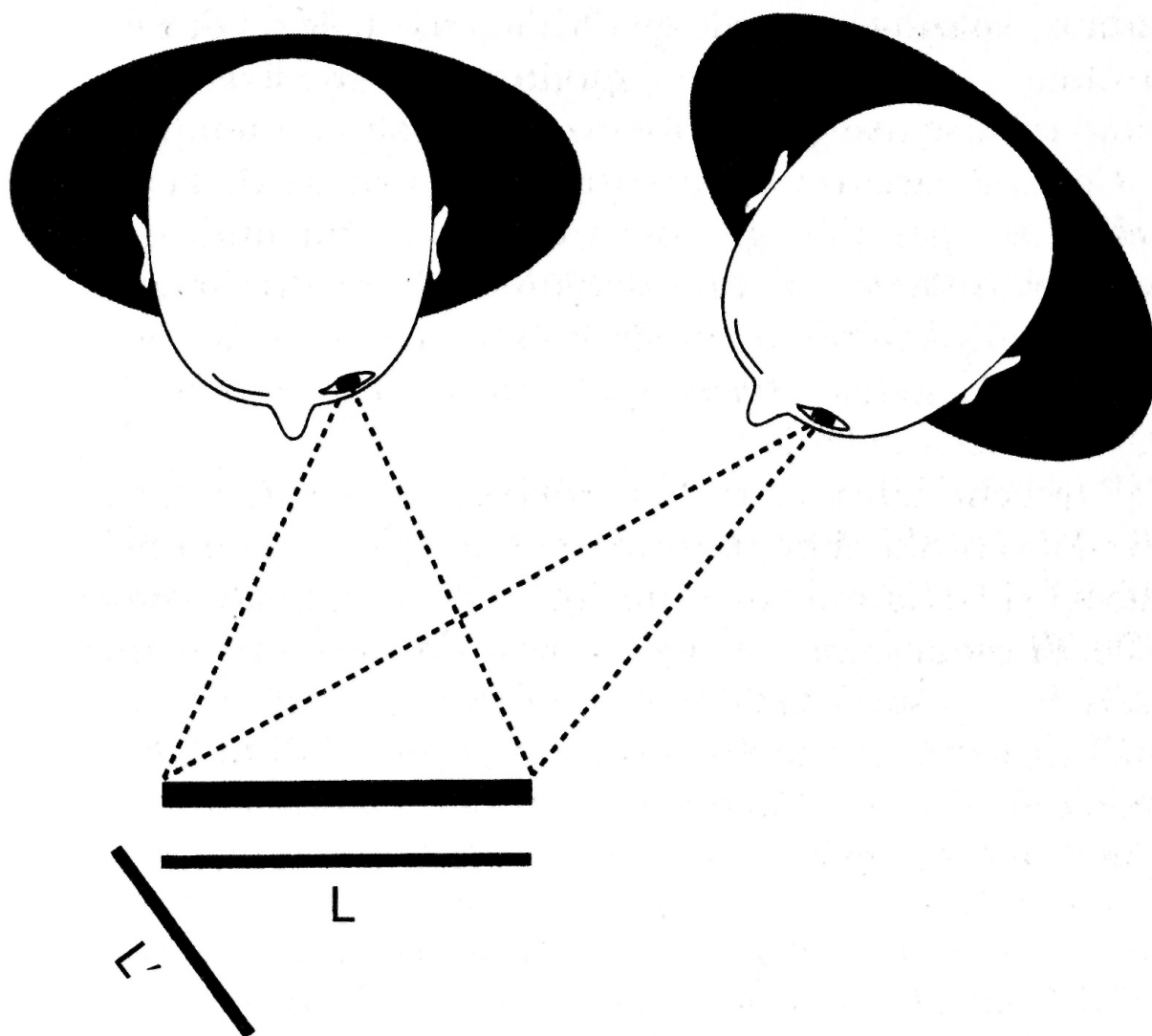



Figura 1

Minkowski immaginò che la distanza spaziale misurata da due osservatori in moto relativo sia una proiezione di una *distanza spazio-temporale quadridimensionale* sottostante sullo spazio tridimensionale che essi sono in grado di percepire; e, similmente, che la «distanza» temporale fra due eventi sia una proiezione della distanza spazio-temporale quadridimensionale sulla loro linea temporale. Come, facendo ruotare un oggetto nelle tre dimensioni, si possono scambiare larghezza e profondità, così il moto relativo nello spazio quadridimensionale può condurre a scambiare le nozioni di «spazio» e «tempo» dei diversi osservatori. Infine, come la lunghezza di un oggetto non cambia se lo facciamo ruotare nello spazio, così la distanza spazio-temporale quadridimensionale fra due eventi è assoluta, e indipendente dal modo in cui diversi osservatori in moto relativo assegnano distanze «spaziali» e «temporali».

Così l'invarianza apparentemente assurda della velocità della luce per tutti gli osservatori fornì un indizio chiave per svelare la vera natura dell'universo quadridimensionale nello spazio-tempo in cui viviamo. *La luce svela la connessione nascosta fra spazio e tempo.* La connessione *è definita* di fatto dalla velocità della luce.

È qui che Einstein tornò in soccorso di *Star Trek.* Una volta che Minkowski ebbe mostrato che lo spazio-tempo nella relatività ristretta era come un foglio di carta quadridimensionale, Einstein spese la maggior parte del decennio seguente a esercitare la sua abilità matematica nel compito di incurvare quel foglio, cosa che a sua volta ci permette di modificare le regole del gioco. Come il lettore ha forse sospettato, anche questa volta la chiave fu la luce.

3 Hawking scopre le carte

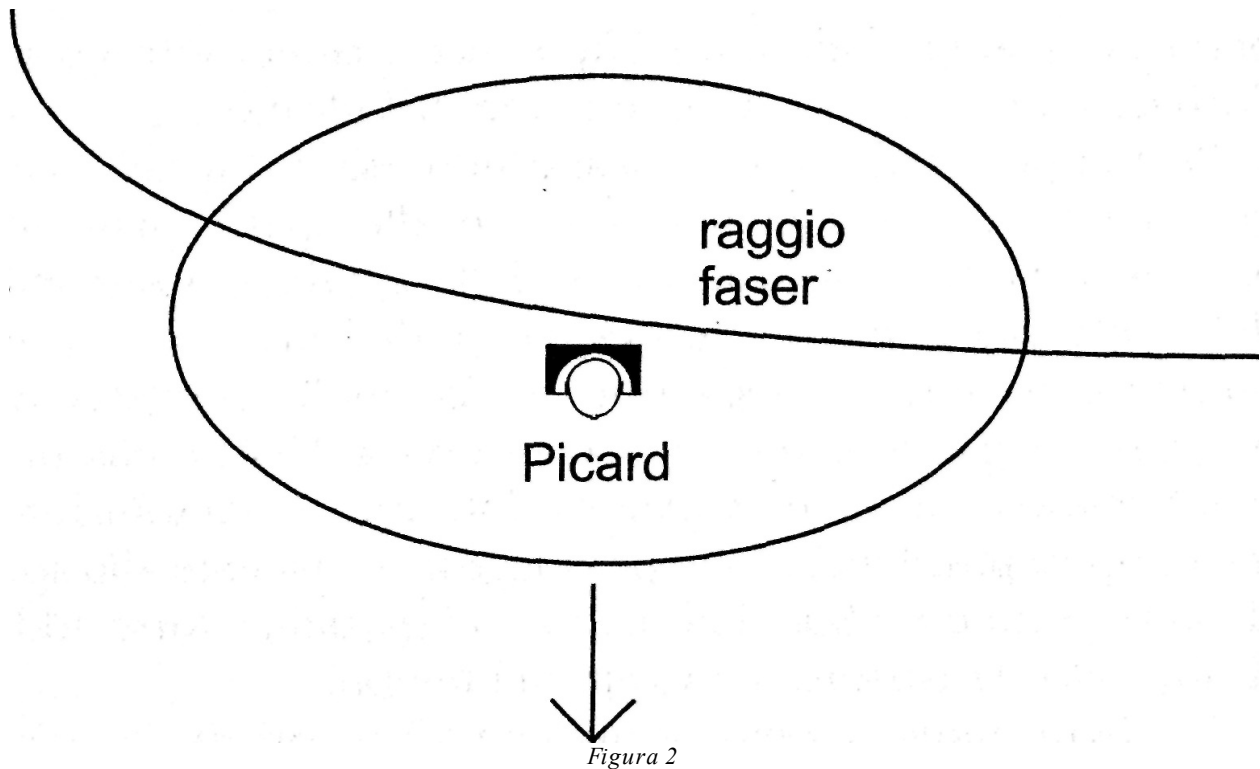
“Quanto poco capite il tempo voi mortali.
Lei dev’essere per forza così lineare, Jean-Luc?”
Q a Picard in Ieri, oggi e domani, II

VULCANO, il pianeta d’origine di Spock, ha una storia venerabile nella fisica del xx secolo. Un grande rompicapo dell’astronomia dell’inizio del Novecento fu il fatto che il perielio del pianeta Mercurio – ossia il punto della sua minima distanza dal Sole – presentava una precessione (ossia anticipava) nel suo moto di rivoluzione attorno al Sole quantitativamente molto piccola ogni anno mercuriano, in disaccordo con la teoria della gravitazione di Newton. Qualcuno fece l’ipotesi che l’orbita di Mercurio potesse essere perturbata da un pianeta più interno non ancora scoperto, cosa che avrebbe permesso di eliminare il disaccordo con la meccanica newtoniana. (In effetti la risoluzione analoga di un’anomalia nell’orbita di Urano aveva condotto in precedenza alla scoperta del pianeta Nettuno.) L’ipotetico pianeta interno all’orbita di Mercurio ricevette il nome di Vulcano.

Purtroppo il mistero di Vulcano non esiste. Einstein suggerì invece che si doveva rinunciare allo spazio piatto di Newton e di Minkowski a favore dello spazio-tempo curvo della relatività generale. In questo spazio curvo l’orbita di Mercurio devierebbe leggermente da quella predetta da Newton, spiegando la discrepanza osservata. Mentre eliminava il bisogno di postulare il pianeta Vulcano, questa soluzione introduceva possibilità molto più suggestive. Assieme allo spazio curvo vennero i buchi neri, i tunnel spaziali, e forse addirittura velocità curvatura e viaggi nel tempo.

In effetti, molto tempo prima che gli autori di *Star Trek* escogitassero campi curvatura, Einstein incurvò lo spazio-tempo e, come gli autori di *Star Trek,* non era armato d’altro che della sua immaginazione. Invece di immaginare la tecnologia delle navi spaziali del XXII secolo, però, Einstein immaginò un ascensore. Era certamente un grande fisico, ma probabilmente non sarebbe mai riuscito a vendere una sceneggiatura per un film.

Le sue argomentazioni, però, possono essere trasferite tali e quali a bordo dell’*Enterprise.* Poiché la luce è il filo che unisce spazio e tempo, le traiettorie dei raggi di luce ci danno una carta dello spazio-tempo con la stessa sicurezza con cui i fili della trama e dell’ordito definiscono i disegni di un arazzo. La luce si propaga in generale in linea retta. Ma che cosa accadrebbe se un comandante romulano a bordo di un Falco da guerra sparasse un raggio faser contro Picard, mentre questi è seduto nella sala di comando del suo yacht *Calypso,* avendo appena acceso il motore a impulso (supporremo che in quest’esempio gli ammortizzatori inerziali siano disattivati)? Picard accelererebbe in avanti, evitando di stretta misura di essere colpito dal raggio faser. Vista nel sistema di riferimento di Picard, la situazione si potrebbe rappresentare come nella figura 2.

Figura 2

Così, per Picard, il raggio faser seguirebbe una traiettoria curva. Che cos’altro noterebbe Picard? In base al ragionamento fatto nel primo capitolo, se gli ammortizzatori inerziali fossero spenti egli sarebbe spinto all’indietro con forza sul suo sedile. In tale occasione avevo anche notato che, se l’accelerazione avesse la stessa intensità dell’accelerazione di

gravità sulla superficie terrestre, Picard si sentirebbe spinto verso il sedile dalla stessa forza che sentirebbe se fosse sulla Terra. Einstein sostenne in effetti che Picard (o un individuo in un ascensore in movimento verso l'alto) non potrebbe mai eseguire alcun esperimento per distinguere fra la forza di reazione dovuta alla sua accelerazione e l'attrazione di gravità esercitata da qualche oggetto vicino di grande massa all'esterno della nave spaziale. Perciò Einstein arrivò là dove nessun fisico era mai giunto prima, e affermò che qualsiasi fenomeno sperimentato da un osservatore in movimento di moto accelerato sarebbe identico ai fenomeni sperimentati da un osservatore in un campo gravitazionale.

Il nostro esempio implica quanto segue: poiché Picard osserva il raggio faser incurvarsi quando si allontana da lui di moto accelerato, il raggio deve incurvarsi anche in un rampo gravitazionale. Ma se i raggi di luce delineano la geometria dello spazio-tempo, anche lo *spazio-tempo* deve incurvarsi in un campo gravitazionale. Infine, poiché la materia produce un campo gravitazionale, anch'essa *deve incurvare lo spazio-tempo*!

Ora, qualcuno potrebbe sostenere che, poiché la luce ha energia, e massa ed energia sono connesse dalla famosa equazione di Einstein, il fatto che i raggi di luce si incurvino in un campo gravitazionale non è una grande sorpresa, e «ertamente non sembra implicare che lo spazio-tempo stesso debba essere incurvato. Dopo tutto, anche le traiettorie seguite dalla materia si incurvano (provate a gettare una palla in aria). Galileo avrebbe potuto benissimo dimostrare – se avesse conosciuto questi oggetti moderni – che le traiettorie delle palle da baseball e dei missili Pathfinder si incurvano, ma non avrebbe mai parlato di uno spazio curvo.

Risulta che si può calcolare quanto dovrebbe incurvarsi un raggio di luce se la luce si comportasse come una palla da baseball, dopo di che si può cercare di misurare sperimentalmente questa deflessione, come fece nel 1919 Sir Arthur Stanley Eddington, quando diresse una spedizione per andare a osservare la posizione apparente di stelle molto vicine al Sole durante un'eclisse solare. Sorprendentemente, si troverebbe, come trovò Eddington, che la luce si incurva esattamente *il doppio* di quanto avrebbe potuto prevedere Galileo se essa si comportasse come una palla da baseball in uno spazio piatto. Come forse avrà congetturato il lettore, questo fattore 2 è esattamente quel che predisse Einstein nell'ipotesi che lo spazio-tempo si incurvasse in prossimità del Sole e che la luce (o anche il pianeta Mercurio) si muovesse localmente in linea retta in questo spazio curvo! Da un giorno all'altro il nome di Einstein divenne popolare.

Lo spazio curvo dischiude un intero universo di possibilità, se mi permettete quest'uso dei termini. D'improvviso noi, e l'*Enterprise,* siamo liberati dai ceppi del tipo di pensiero lineare impostoci nel contesto della relatività ristretta, quel tipo di pensiero che *Q*, per citarne uno, sembra tanto aborrire. Su una varietà curva si possono fare tante cose che sono impossibili su una piatta. Per esempio, si può continuare a viaggiare sempre nella stessa direzione e ritrovarsi al punto di partenza: le persone che fanno viaggi intorno al mondo sperimentano ogni volta qualcosa di simile.

La premessa centrale della relatività generale di Einstein è semplice da formulare a parole: la curvatura dello spazio-tempo è determinata direttamente dalla distribuzione della materia e dell'energia in esso contenute. Le equazioni di Einstein forniscono, in effetti, semplicemente la precisa relazione matematica fra la curvatura da un lato e la materia e l'energia dall'altro:

Membro di sinistra
(**curvatura**)

=

Membro di destra
(**materia ed energia**)

Ciò che rende la teoria così diabolicamente difficile è questo semplice anello di retroazione: la curvatura dello spazio-tempo è determinata dalla distribuzione della materia ed energia nell'universo, ma questa distribuzione è a sua volta governata dalla curvatura dello spazio. È come la storia dell'uovo e della gallina. Chi è nato prima? La materia opera come sorgente della curvatura, la quale determina a sua volta l'evoluzione della materia, che a sua volta modifica la curvatura, e via dicendo.

Questo potrebbe essere il singolo aspetto più importante della relatività generale, per quanto riguarda *Star Trek.* La complessità della teoria è tale che non ne abbiamo ancora capito tutte le conseguenze; perciò non possiamo escludere varie possibilità esotiche. Proprio queste possibilità esotiche fanno gioco per *Star Trek.* Vedremo in effetti che esse si fondano su una grande incognita che permea tutto, dai tunnel spaziali e dai buchi neri alle macchine del tempo.

La prima implicazione importante per le avventure dell'*Enterprise* del fatto che lo spazio-tempo non dev'essere necessariamente piatto è che il tempo stesso diventa una quantità ancora più dinamica di com'era nella relatività ristretta. Il tempo può scorrere con ritmo diverso per diversi osservatori anche se non sono in moto l'uno relativamente all'altro.

Pensiamo al tic-tac di un orologio come se i singoli movimenti della lancetta dei secondi fossero marcati con trattini su un regolo di gomma. Se stirassimo o flettessimo il regolo, l'intervallo fra i singoli trattini differirebbe da un punto all'altro. Se questi intervalli rappresentassero i tic e tac di un orologio, gli orologi situati in luoghi diversi potrebbero ticchettare a ritmi diversi. Nella relatività generale l'unico modo per «flettere» il regolo è la presenza di un campo gravitazionale, che richiede a sua volta la presenza di materia.

Per tradurre questi concetti in termini più pragmatici, se io metto una pesante palla di ferro vicino a un orologio, essa dovrebbe modificare la rapidità del suo ticchettio. O, in termini ancora più pratici, se vado a dormire con la sveglia accostata alla massa in quiete del mio corpo, mi sveglierò un po' dopo di quanto mi sveglierei altrimenti, almeno agli occhi del resto del mondo.

Un esperimento famoso compiuto nel 1960 nei laboratori di fisica dell'Università di Harvard dimostrò per la prima volta che il tempo può dipendere da dove ci si trova. Robert Pound e George Rebka mostrarono che la frequenza della radiazione gamma misurata alla sua sorgente, nel seminterrato dell'edificio, differiva dalla frequenza della radiazione ricevuta 23 metri più in alto, sul tetto dell'edificio (con i rivelatori calibrati con cura, in modo che qualunque differenza osservata non dipendesse dal rivelatore). La differenza misurata risultò essere incredibilmente piccola, di circa 1 parte su mille bilioni. Se ogni ciclo delle onde dei raggi gamma è uguale alla durata di un tic di un orologio atomico, quest'esperimento comporta che un orologio nel seminterrato dell'edificio sia più lento di un orologio equivalente sul tetto. Il tempo scorre più lentamente nel seminterrato che sul tetto grazie alla sua distanza minore dal centro della Terra; nel seminterrato, quindi, il campo gravitazionale è più intenso, e quindi la curvatura dello spazio-tempo maggiore. Per quanto piccolo fosse questo effetto, era esattamente il valore predetto dalla relatività generale, nell'ipotesi che lo spazio-tempo si incurvi in prossimità della Terra. Pur essendo molto piccolo, quest'effetto ha un'importanza vitale nella moderna vita quotidiana. Un esempio particolarmente significativo è quello dei dispositivi GPS (Global Positioning System), che si sono recentemente diffusi per agevolare la guida degli automobilisti. Questi dispositivi ricevono segnali diffusi da satelliti situati in orbite circumterrestri alte circa 20.000 km. Confrontando i tempi d'arrivo degli impulsi provenienti dai diversi satelliti, il dispositivo può localizzare esattamente la sua posizione sulla Terra. I vari satelliti sono però situati in orbite diverse e i loro orologi misurano perciò il tempo in modo lievissimamente diverso. Benché questi effetti siano infinitesimi, hanno però un significato alla scala determinante per l'esattezza del GPS nel determinare la propria posizione. Le letture degli orologi devono perciò essere corrette tenendo conto degli effetti della gravità; in caso contrario i sistemi di tracciamento satellitari sarebbero soggetti a errori di localizzazione inaccettabili nel corso di pochi secondi.

La seconda implicazione dello spazio curvo è forse ancora più interessante in relazione ai viaggi spaziali. Se lo spazio è incurvato, una linea retta non è necessariamente la distanza più breve fra due punti. Ecco un esempio. Consideriamo un cerchio su un pezzo di carta (figura 3). Di norma la distanza più corta fra due punti *A* e *B* situati su lati opposti del cerchio è data dalla linea che li unisce passando per il centro del cerchio:

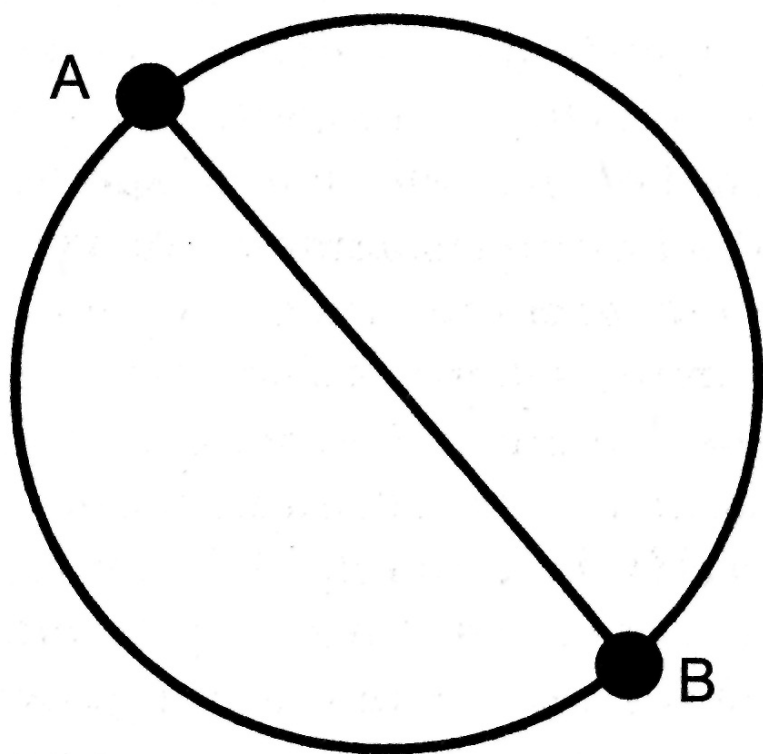



Figura 3

Se, invece, per andare da *A* a *B* si dovesse percorrere la circonferenza, il viaggio sarebbe una volta e mezzo più lungo. Vorrei però disegnare lo stesso cerchio su un foglio di gomma, e poi deformarne la regione centrale (figura 4).

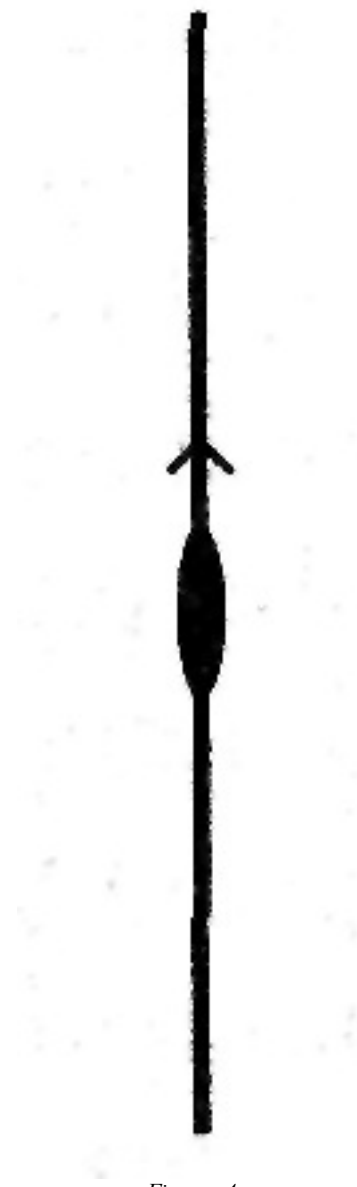



Figura 4

Ora, osservandolo nella nostra ottica tridimensionale, è chiaro che il percorso da *A* a *B* passando per il centro della regione sarà molto più lungo che percorrendo la circonferenza del cerchio. Si noti che, se fotografiamo questa situazione dall'alto, in modo da avere solo una prospettiva bidimensionale, la linea da *A* a *B* ci apparirà simile a una linea retta. Fatto forse più pertinente, se un minuscolo insetto (o degli esseri bidimensionali come quelli in cui si imbatte in un suo viaggio l'*Enterprise*) dovessero seguire la linea da *A* a *B* passando per il centro sempre camminando sulla superficie del foglio, questa traiettoria apparirebbe in linea retta. L'insetto sarebbe sorpreso nel trovare che la linea retta fra *A* e *B* passando per il centro non è la distanza minore fra questi due punti. Se l'insetto fosse intelligente, sarebbe costretto a concludere che lo spazio bidimensionale in cui vive è curvo. Solo vedendo come questo foglio sprofondi nel sottostante spazio tridimensionale noi possiamo osservare direttamente la curvatura.

Ora, ricordiamoci che viviamo in uno spazio-tempo quadridimensionale che può essere incurvato, e che non possiamo percepire direttamente la curvatura di questo spazio, più di quanto l'insetto che cammina sulla superficie del foglio possa scoprire la curvatura del foglio stesso. Penso che il lettore sappia dove sto parando: se, nello spazio curvo, la distanza più breve fra due punti non è necessariamente una linea retta, potrebbe esserci la possibilità di percorrere quella che, *lungo la linea visuale,* può sembrare una distanza immensa, trovando una via più breve attraverso lo spazio-tempo curvo.

Le proprietà che ho descritto sono la sostanza di cui sono fatti i sogni di *Star Trek.* La domanda, ovviamente, è: quanti di questi sogni potrebbero un giorno avverarsi?

Tunnel spaziali: realtà e fantasia

Il tunnel bajoriano in *Deep Space Nine* è forse il più famoso dei tunnel spaziali che compaiono nelle serie *Star Trek,* anche se ce ne sono stati numerosi altri, fra cui quello molto pericoloso che riuscì a creare Scotty squilibrando la miscela di materia-antimateria nel motore di curvatura dell'*Enterprise,* l'instabile tunnel dei Barzani, in cui si perse una nave dei Ferenti nell'episodio *Il tunnel spaziale,* della serie *The Next Generation;* e il tunnel temporale in cui si imbatté il *Voyager* nel suo tentativo di tornare a casa dal bordo lontano della Galassia.

L'idea che dà origine ai tunnel nello spazio-tempo è esattamente quella che ho appena descritto. Se lo spazio-tempo è incurvato, potrebbero esserci modi diversi per collegare due punti in modo che la distanza fra loro sia molto più corta di quella che sarebbe misurata viaggiando «in linea retta» nello spazio curvo. Poiché i fenomeni dello spazio curvo nelle quattro dimensioni sono impossibili da visualizzare, facciamo ricorso ancora una volta a un foglio di gomma bidimensionale, di cui possiamo osservare la curvatura immergendolo nello spazio tridimensionale.

Se il foglio è incurvato su grande scala, potremmo immaginare che abbia un aspetto simile a questo illustrato nella figura 5.

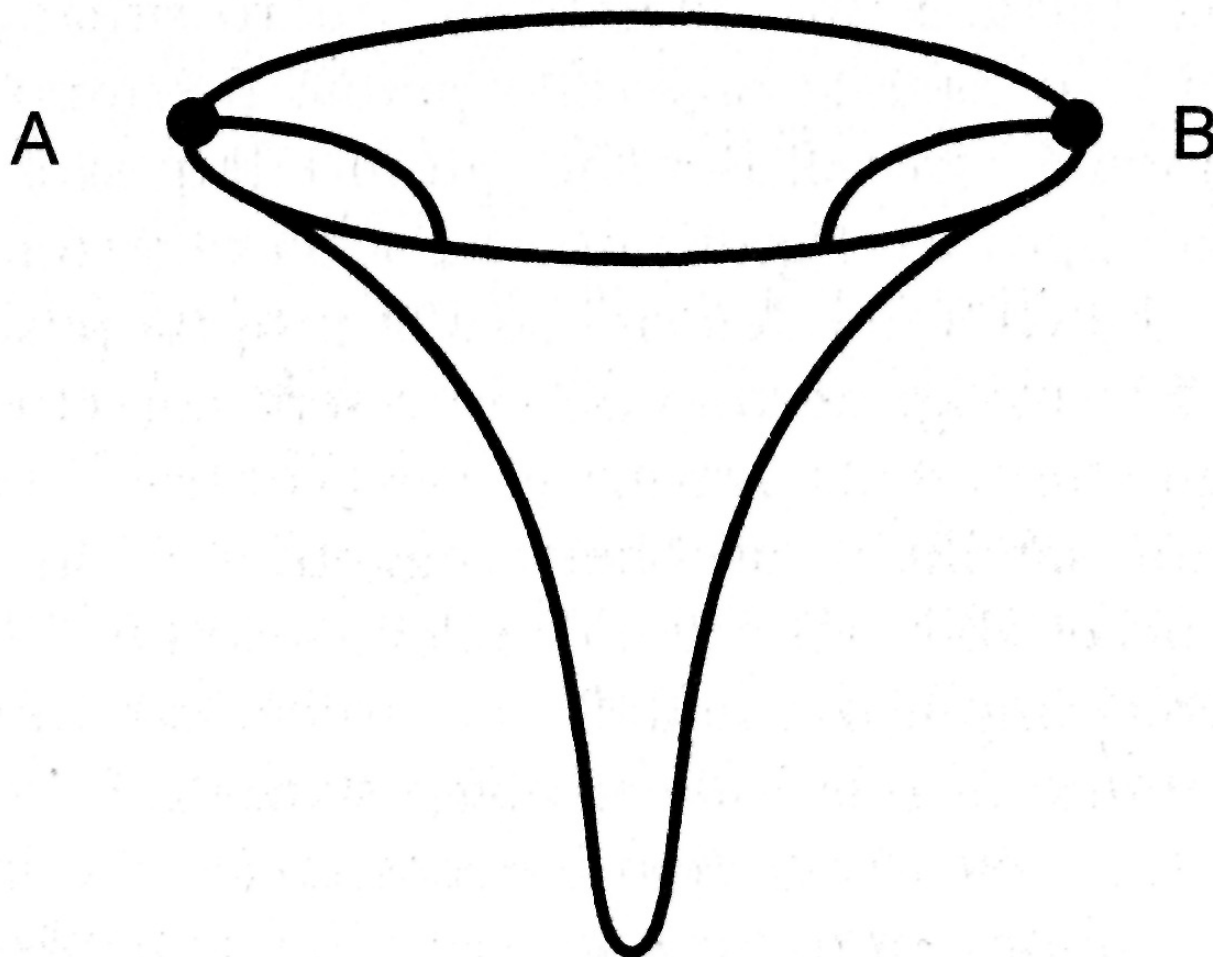



Figura 5

È chiaro che se, dopo avere conficcato una matita in *A* e avere spinto il foglio deformandolo fino a toccare *B,* ne unissimo le due parti come nella figura 6, creeremmo un percorso da *A* a *B* molto più corto di quello che, per andare da un punto all'altro, segue la superficie del foglio. Si osservi inoltre che il foglio sembra piatto sia in prossimità di *A* sia vicino a *B.* La curvatura che porta questi due punti abbastanza vicini fra loro da permetterne l'unione per mezzo di un tunnel è dovuta alla flessione globale del foglio su grandi distanze. Un piccolo insetto (anche intelligente) situato in *A,* che potesse muoversi solo camminando sul foglio, non potrebbe avere alcuna idea della «vicinanza» di *B* neppure se potesse fare qualche esperimento attorno ad *A* per accertare un'eventuale curvatura del foglio.

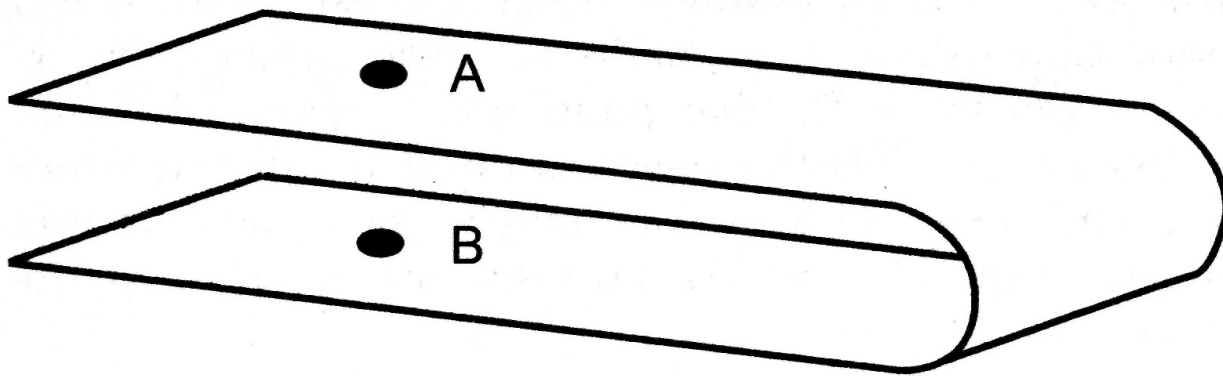



Figura 6

Come il lettore avrà senza dubbio sospettato, il tunnel che collega *A* e *B* nella figura 6 è un analogo bidimensionale di un tunnel tridimensionale che potrebbe, in linea di principio, collegare fra loro regioni lontane dello spazio-tempo. Per quanto interessante possa essere questa possibilità, ci sono vari aspetti ingannevoli del quadro che vorrei sottoporre alla vostra attenzione. In primo luogo, benché il foglio curvo sia presentato immerso in uno spazio tridimensionale per farci «vedere» la sua curvatura, può esistere anche senza che esista lo spazio tridimensionale attorno a esso. Così, benché possa esistere un tunnel fra *A e B,* non c'è alcun senso in cui *A e B* possano essere considerati «vicini» *se non è presente* il tunnel. Non c'è alcuna possibilità di lasciare il foglio di gomma e di passare da *A* a *B* attraverso lo spazio tridimensionale in cui il foglio è immerso. Se non ci fosse lo spazio tridimensionale, il foglio di gomma sarebbe tutto ciò che c'è nell'universo.

Immaginiamo quindi di far parte di una civiltà infinitamente avanzata (ma non così avanzata come quella degli onnipotenti esseri Q, che sembrano trascendere le leggi della fisica), la quale abbia la capacità di costruire tunnel spaziali. Il nostro dispositivo per la costruzione di tunnel dovrebbe essere simile alla matita nell'esempio che ho appena dato. Se avessimo il potere di produrre immense curvature locali nello spazio, dovremmo provare e riprovare ciecamente in varie zone nella speranza di poter collegare fra loro due regioni di spazio che, lino all'instaurazione di tale tunnel, erano molto lontane l'una dall'altra. È il processo stesso di costruzione del ponte Ira loro a cambiare la natura complessiva dello spazio-tempo. Perciò la costruzione di un tunnel non va presa troppo alla leggera. Quando il premier di Barzan, la signora Bhavani, si recò sull'*Enterprise* per mettere all'asta il tunnel dei Barzani, esclamò: «Eccolo, signori: il primo e unico tunnel spaziale stabile di cui si conosca l'esistenza!» Purtroppo il tunnel non era stabile; in effetti gli unici tunnel spaziali la cui esistenza matematica sia stata consistentemente stabilita nel contesto della relatività generale sono transitori. Tali tunnel si creano quando due microscopiche «singolarità» – regioni dello spazio-tempo in cui la curvatura diventa estremamente forte – si dovano e si uniscono temporaneamente. Il tunnel, però, si richiude in un tempo più breve di quello che un viaggiatore impiegherebbe a percorrerlo, lasciando nuovamente due singolarità non collegate fra loro. Lo sfortunato esploratore sarebbe fatto a pezzi nell'una o nell'altra singolarità prima di essere in grado di completare il percorso del tunnel.

Il problema di come tenere aperta l'imboccatura di un tunnel è stato estremamente difficile da risolvere nei suoi dettagli matematici, ma si può formulare molto semplicemente in termini fisici: la gravità attrae! Qualsiasi tipo di materia o energia normale tenderà a collassare sotto la propria attrazione gravitazionale, a meno che qualcos'altro non arresti questo collasso. Similmente, in condizioni normali l'imboccatura di un tunnel tende a richiudersi.

Il trucco consiste quindi nell'eliminare le circostanze normali. In anni recenti il fisico del Caltech Kip Thorne, fra gli altri, ha sostenuto che l'unico modo per mantenere aperto un tunnel spaziale è quello di introdurre in esso del «materiale esotico». Con quest'espressione si intende materiale che, almeno nelle misurazioni di certi osservatori, risulterà avere energia «negativa». Come potreste attendervi (anche se le attese ingenue sono notoriamente sospette nella relatività generale), un tale materiale tenderebbe a «respingere» e non ad «attrarre», in relazione alla forza di gravità.

Nemmeno il trekker più ostinato potrebbe essere disposto a sospendere i suoi dubbi abbastanza a lungo da accettare l'idea di una materia con «energia negativa»; tuttavia, come abbiamo notato, nello spazio curvo le attese normali sono spesso sospette. Quando poi combiniamo tutto questo con gli elementi esotici imposticі dalle leggi della meccanica quantistica, che governano il comportamento della materia su piccola scala, quasi tutte le scommesse sono letteralmente perdute.

I buchi neri e il dottor Hawking

Facciamo entrare in scena Stephen Hawking. Egli divenne ben noto fra i fisici che si occupano della relatività generale per la parte che ebbe, negli anni '60, nella dimostrazione di teoremi generali connessi a singolarità nello spazio-tempo e poi, nel

decennio successivo, per le sue notevoli scoperte teoriche sul comportamento dei buchi neri. Questi oggetti sono formati da materiali collassati in modo così totale che il campo gravitazionale alla loro superficie è talmente intenso da impedire la fuga persino alla luce.

Per inciso, l'espressione «buco nero», che ha catturato con tanta forza l'immaginazione popolare, fu coniata dal fisico teorico John Archibald Wheeler verso la fine dell'autunno del 1967. Questa data è molto interessante perché, a quanto so, il primo episodio di *Star Trek* che si riferisce a un buco nero, chiamato «stella nera», fu trasmesso nel 1967, prima che Wheeler avesse mai usato pubblicamente il termine. Quando guardai quest'episodio, nella fase iniziale della preparazione di questo libro, trovai divertente che gli autori di *Star Trek* avessero sbagliato il nome. Ora mi rendo conto che furono invece sul punto di inventarlo!

I buchi neri sono oggetti notevoli per una varietà di ragioni. Innanzitutto, essi celano al loro centro una singolarità spazio-temporale, e qualsiasi cosa cada nel buco nero deve inevitabilmente entrare in contatto con essa. In corrispondenza con una tale singolarità – una «cuspide» infinitamente incurvata nello spazio-tempo – le leggi della fisica come le conosciamo perdono ogni valore. La curvatura nei pressi della singolarità è così grande su una regione così piccola che gli effetti della gravità sono governati dalle leggi della meccanica quantistica. Nessuno è però mai riuscito finora a scrivere una teoria in grado di conciliarsi sia con la relatività generale (cioè con la gravità) sia con la meccanica quantistica. Gli autori di *Star Trek* riconobbero correttamente questa lensione fra la meccanica quantistica e la gravità, se è vero che si riferiscono di solito alle singolarità dello spazio-tempo come a «singolarità quantistiche». Una cosa, però, è certa: quando il campo gravitazionale al centro di un buco nero l'aggiunge un'intensità abbastanza grande da invalidare il nostro quadro attuale della fisica, qualsiasi oggetto fisico comune sarà fatto a pezzi in modo tale da risultare irriconoscibile. Nulla potrebbe sopravvivere intatto.

Ho detto, come il lettore ha forse notato, che i buchi neri «celano» una singolarità al loro centro. Ho usato quest'espressione perché alla periferia di un buco nero c'è una superficie matematicamente definita nota come «orizzonte degli eventi», la quale ci impedisce di vedere che cosa accada agli oggetti che cadono nel buco. Tutto ciò che entra all'interno dell'orizzonte degli eventi finisce inevitabilmente per entrare in collisione con la minacciosa singolarità. Nessun oggetto che si trovi all'interno dell'orizzonte degli eventi può sfuggirne. Anche se un osservatore così sfortunato da cadere all'interno dell'orizzonte degli eventi non noterà niente di speciale nel momento in cui lo attraversa, la situazione apparirà molto diversa a un osservatore che guardi da molto lontano ciò che sta accadendo. Per l'osservatore che scende in caduta libera verso l'orizzonte degli eventi il tempo rallenta il suo corso relativamente all'osservatore lontano. Di conseguenza l'osservatore in caduta, visto dall'esterno, sembra rallentare il suo moto mentre si avvicina all'orizzonte degli eventi. Quanto più si avvicina all'orizzonte, tanto più il suo orologio rallenta rispetto a quello dell'osservatore esterno. Benché l'osservatore in caduta possa impiegare alcuni istanti (nel tempo locale) ad attraversare l'orizzonte degli eventi – dove, ripeto, non accade per lui niente di speciale –, il suo passaggio per tale linea ideale sembrerà richiedere un'eternità a un osservatore che guardi dall'esterno. L'oggetto o l'osservatore in caduta nel buco nero sembra come congelato nel tempo.

Diventa inoltre progressivamente più difficile osservare dall'esterno la luce emanata da un oggetto in caduta. Man mano che si avvicina all'orizzonte degli eventi, l'oggetto diventa sempre meno luminoso (perché la radiazione osservabile da esso emanata si sposta verso frequenze al di sotto della luce visibile). Infine, quand'anche da fuori si potesse osservare l'oggetto attraversare l'orizzonte (cosa che non si può osservare in una durata di tempo finita), l'oggetto sparirebbe completamente una volta superata tale linea, perché la luce che esso emette rimarrebbe catturata all'interno, assieme all'oggetto stesso. Qualsiasi cosa cada all'interno di tale orizzonte è perduta per sempre per il mondo esterno. Pare che questa mancanza di comunicazione sia una via a senso unico: un osservatore dall'esterno può inviare segnali *nel* buco nero, mentre dal buco nero non potrà mai uscire nessun segnale in risposta.

Perciò i buchi neri in cui ci imbattiamo in *Star Trek* tendono a produrre risultati impossibili. Il fatto che l'orizzonte degli eventi non sia un oggetto tangibile ma piuttosto una delimitazione matematica che noi imponiamo alla nostra descrizione di un buco nero per dividere la regione interna da quella esterna, significa che l'orizzonte non può avere una «crepa», come sostiene l'equipaggio del *Voyager* miracolosamente riemerso dall'interno di un buco nero. (Questa nozione, in effetti, è così assurda da rientrare nel mio elenco dei dieci errori più gravi di *Star Trek* descritti nell'ultimo capitolo.) E le «forme di vita della singolarità quantistica» incontrate dall'equipaggio dell'*Enterprise* quando questa, assieme a un Falco da guerra romulano, viaggia in avanti e all'indietro nel tempo, nidificano in un luogo piuttosto infelice per i loro piccoli: a quanto pare li mettono all'interno di buchi neri naturali (da loro scambiati erroneamente per la singolarità quantistica «artificiale» all'interno del nocciolo del motore romulano). I buchi neri possono essere un posto abbastanza sicuro, salvo che in seguito può essere difficile ricuperare i propri piccoli. Ricordo al lettore che niente di ciò che si trova all'interno di un buco nero può mai comunicare con qualcosa che si trova all'esterno.

Tuttavia i buchi neri, nonostante tutte le loro proprietà interessanti, non devono essere necessariamente così esotici. Gli

unici buchi neri su cui abbiamo attualmente qualche indizio nell'universo sono la conseguenza del collasso di stelle di massa molto maggiore di quella del Sole. Questi oggetti collassati sono così densi che un cucchiaino da tè del loro materiale peserebbe molte tonnellate. Un'altra proprietà notevole dei buchi neri è però il fatto che, quanto maggiore è la loro massa, tanto minore può essere la loro densità quando si formano. Per esempio, la densità di un buco nero formato dal collasso di un oggetto di massa 100 milioni di volte maggiore di quella del nostro sole può non essere superiore a quella dell'acqua. Un oggetto di massa maggiore collasserà a formare un buco nero già a una densità molto minore. Se si continua a estrapolare, si troverà che la densità richiesta per formare un buco nero di massa pari a quella dell'universo osservabile sarà press'a poco uguale alla densità media nell'universo! Il nostro universo potrebbe essere un buco nero.

Nel 1974 Stephen Hawking fece una scoperta notevole sulla natura dei buchi neri: essi non sono completamente neri! Accade invece che emettano una radiazione a una temperatura caratteristica, la quale dipende dalla loro massa. Benché la natura di questa radiazione non fornisca alcuna informazione su ciò che è caduto nel buco nero, l'idea che da un buco nero possa venire emessa della radiazione era tuttavia sorprendente, e sembrava violare vari teoremi – alcuni dei quali erano stati in precedenza dimostrati dallo stesso Hawking –, secondo i quali la materia poteva solo entrare nei buchi neri, non uscirne. Questa tesi rimaneva vera, eccezion fatta per la radiazione dei buchi neri, la quale non è normale materia. È invece lo spazio vuoto a potersi comportare in modo del tutto esotico, specialmente in prossimità di un buco nero.

Da quando le leggi della meccanica quantistica furono conciliate con la teoria della relatività ristretta, poco tempo dopo la seconda guerra mondiale, sappiamo che lo spazio vuoto non è completamente vuoto, bensì è un mare ribollente di fluttuazioni quantiche. Queste fluttuazioni emettono di tanto in tanto coppie di particelle elementari, le quali esistono per durate di tempo così brevi che non possiamo misurarle direttamente, tornando poi a sparire nel vuoto da cui sono venute. Il principio di indeterminazione della meccanica quantistica ci dice che non esiste alcun modo per scandagliare direttamente lo spazio vuoto su durate di tempo così brevi, e che quindi non c'è alcun modo per negare l'effimera esistenza di queste cosiddette particelle virtuali. Ma benché esse non possano essere misurate direttamente, la loro presenza incide su certi processi fisici che noi *possiamo* misurare, come il ritmo e l'energia delle transizioni fra certi livelli di energia negli atomi. L'effetto previsto delle particelle virtuali concorda con le osservazioni, oltre che con ogni previsione nota in fisica.

Tutto questo ci riporta al notevole risultato conseguito da Hawking sui buchi neri. In circostanze normali, quando una fluttuazione quantica crea una coppia di particelle virtuali le due particelle si annichilano e tornano a sparire nel vuoto in un tempo abbastanza breve perché non sia osservabile la violazione della conservazione dell'energia (nella quale si incorre nel caso della creazione di coppie dal nulla). Quando però una coppia di particelle virtuali si forma nello spazio curvo in prossimità di un buco nero, una delle due particelle può cadere nel buco, mentre l'altra può sfuggirne ed essere osservata. Ciò dipende dal fatto che la particella che cade nel buco nero può, in linea di principio, perdere nel corso di questo processo più energia di quella richiesta per crearla dal nulla. Questa «energia negativa» si produce attingendo all'energia del buco nero, che diminuisce. Questa situazione soddisfa il bilancio energetico della conservazione dell'energia, compensando l'energia posseduta dalla particella che riesce a sfuggire. È così che il buco nero può emettere radiazione. Inoltre, poiché nel corso di questo processo si ha una graduale diminuzione dell'energia del buco nero, si verifica in concomitanza una diminuzione della sua massa. Infine, il buco nero può evaporare completamente, lasciando solo la radiazione che ha prodotto nel corso della sua esistenza.

Hawking e molti altri si sono spinti oltre una considerazione delle fluttuazioni quantiche della materia in uno spazio di fondo curvo, prendendo in esame qualcosa di ancora più esotico e meno ben definito. Se la meccanica quantistica si applica non solo alla materia e alla radiazione ma anche alla gravità, allora, su scale abbastanza piccole devono verificarsi fluttuazioni quantiche nello spazio-tempo stesso. Purtroppo non abbiamo una teoria funzionante per occuparci di tali processi, ma questo fatto non ha impedito una quantità di tentativi di investigazioni teoriche dei fenomeni che potrebbero risultarne. Una delle congetture più interessanti è che processi quantomeccanici potrebbero permettere la creazione spontanea non solo di particelle bensì di interi nuovi universi neonati. Le formule della meccanica quantistica che descrivono in che modo ciò potrebbe avvenire sono, almeno matematicamente, molto simili alle soluzioni dei tunnel scoperti nella comune relatività generale. Attraverso tali tunnel «euclidei» si crea un «ponte» temporaneo, da cui scaturisce un nuovo universo. Le possibilità di tunnel euclidei e di universi neonati sono abbastanza esaltanti da far menzionare le fluttuazioni quantiche nel corso della partita a poker di Hawking con Einstein e Newton nell'episodio *Il ritorno dei Borg,* della serie *The Next Generation*[11]. Se gli autori di *Star Trek* erano confusi, avevano ragione di esserlo. Purtroppo questi problemi sono molto oscuri. Fino a quando non scopriremo la cornice matematica appropriata per trattare tali processi gravitazionali quantistici, tutte queste discussioni rimarranno piuttosto infruttuose.

Quel che è più rilevante qui non è il fenomeno dell'evaporazione dei buchi neri, o addirittura quello degli universi neonati, per quanto interessanti possano essere, bensì piuttosto la scoperta che le fluttuazioni quantiche dello spazio vuoto possono, almeno in presenza di intensi campi gravitazionali, essere dotate di proprietà che ricordano quelle richieste per tenere aperto un tunnel spaziale. L'interrogativo centrale, che non ha ancora una risposta definitiva, è se le fluttuazioni quantiche nei pressi di un buco nero possano comportarsi in modo abbastanza esotico da permettere di tenere aperto un tunnel.

(A proposito, ancora una volta, ho trovato gli autori di *Star Trek* notevolmente prescienti nella loro scelta terminologica. Si dice che il tunnel bajoriano e quello dei Barzani implichino campi «verteroniali». Non ho idea se questo nome sia stato inventato di sana pianta o no. Poiché però le particelle virtuali – le fluttuazioni quantiche nello spazio altrimenti vuoto – sono attualmente le migliori candidate a rappresentare la «materia esotica» di Kit Thorne, io penso che gli autori di *Star Trek* meritino credito per la loro intuizione, se le cose stanno effettivamente così.) Più in generale, se le fluttuazioni quantiche nel vuoto possono essere esotiche, non potrebbe soddisfare le richieste qualche altra configurazione non classica di materia e radiazione, come per esempio un guasto nel nocciolo del motore di curvatura di Scotty o anche uno squilibrio nella miscela fra materia e antimateria? Le domande come questa rimangono senza risposta. Pur non aggirando affatto l'incredibile implausibilità dei tunnel spaziali stabili nell'universo reale, esse lasciano aperta la domanda più importante se sia impossibile o solo quasi impossibile percorrere tunnel spaziali. Il problema dei tunnel spaziali non è soltanto un problema di contrapposizione fra fatti scientifici e fantascienza: è una chiave che può aprire porte che molti preferirebbero lasciare chiuse.

Le macchine del tempo rivisitate

I tunnel spaziali, per quanto importanti possano essere ai fini dei viaggi su distanze molto lunghe, hanno un potenziale ancora più notevole, che è stato intravisto recentemente nell'episodio della serie *Voyager, Eye of the Needle.* In quest'episodio l'equipaggio del *Voyager* scopre un piccolo tunnel spaziale che riporta al «quadrante alfa» della Galassia. Dopo aver comunicato attraverso di esso, l'equipaggio trova con terrore che il tunnel non conduce al proprio quadrante alfa, che ben conosceva, bensì al quadrante alfa di una generazione anteriore. I due estremi del tunnel collegano lo stesso spazio in due tempi diversi!

Beh, questo è un altro dei casi in cui gli autori della serie *Voyager* hanno avuto ragione. Se i tunnel spaziali esistono, possono essere e saranno macchine del tempo! Questa sorprendente presa di coscienza si è imposta nel corso dell'ultimo decennio, quando vari teorici, per mancanza di qualcosa di più interessante da fare, cominciarono a investigare un po' più seriamente la fisica dei tunnel. È facile progettare macchine del tempo a tunnel: l'esempio forse più semplice (dovuto di nuovo a Kip Thorne) consiste nell'immaginare un tunnel con un estremo fisso e l'altro in movimento a una velocità grande ma inferiore a quella della luce in una regione lontana della Galassia. In linea di principio, ciò è possibile *persino se* la lunghezza del tunnel rimane invariata. Nel mio anteriore disegno dei tunnel bidimensionali, si può semplicemente tirare la metà inferiore del foglio verso sinistra, facendo sì che dello spazio «scivoli» rispetto all'imboccatura inferiore del buco nero, mentre questa rimane fissa rispetto all'altra imboccatura del tunnel (figura 7).

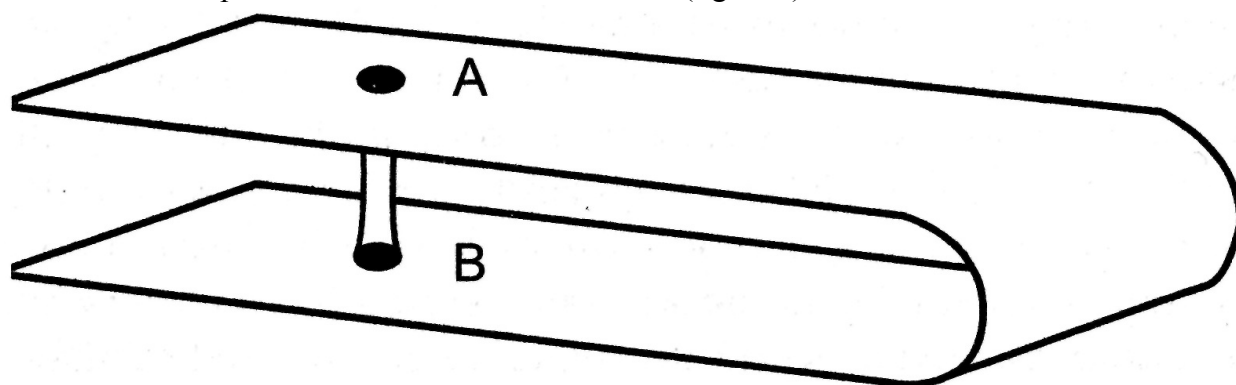



Figura 7

Poiché l'imboccatura inferiore del tunnel sarà in movimento rispetto allo spazio in cui esso si trova, mentre l'imboccatura superiore no, la relatività ristretta ci dice che alle due imboccature gli orologi segneranno il tempo a ritmi diversi. D'altro canto, se la lunghezza del tunnel rimane fissa, finché ci si trova all'interno del tunnel i due estremi appaiono in quiete l'uno relativamente all'altro. In questa cornice, gli orologi alle due estremità dovrebbero segnare il tempo con lo stesso ritmo. Ora, facciamo riscivolare indietro il foglio inferiore dov'era prima, cosicché l'imboccatura inferiore del tunnel

venga a trovarsi dov'era all'inizio rispetto allo spazio di fondo. Diciamo che questo processo richieda un giorno, secondo l'osservazione di qualcuno che si trovi vicino all'imboccatura inferiore del tunnel. Per un osservatore che si trovi invece nei pressi dell'imboccatura superiore, questo stesso processo potrebbe richiedere dieci giorni. Se questo secondo osservatore guardasse attraverso l'imboccatura superiore del tunnel per vedere l'osservatore situato presso l'imboccatura inferiore, vedrebbe sul calendario appeso al muro accanto a tale osservatore una data anteriore di nove giorni. Se egli deciderà di entrare nel tunnel per andare a far visita al secondo osservatore, farà un viaggio a ritroso nel tempo. Se non vi disturba troppo, potreste aggiungere la seguente curiosa considerazione. Supponiamo che occorrano due giorni per passare da B ad A viaggiando nello spazio normale. Usando invece il tunnel spazio-temporale, ne uscireste nove giorni prima, e prendendo subito una nave spaziale arrivereste nello stesso punto da cui siete partiti, ma la cosa notevole è che arrivereste sette giorni prima di esserne partiti!

Se esistono tunnel spaziali stabili, dobbiamo perciò concedere che siano possibili macchine del tempo. Torniamo finalmente alle osservazioni di Einstein di cui ci siamo occupati all'inizio del capitolo 2. Si possono escludere i viaggi nel tempo, e quindi tunnel spaziali stabili, e quindi materia esotica con energie negativa, «sulla base di principi fisici»?

I tunnel spaziali, dopo tutto, sono solo un esempio di macchine del tempo che sono state proposte nel contesto della relatività generale. Data la nostra precedente discussione sulla natura della teoria, non è forse così sorprendente che i viaggi nel tempo diventino una possibilità. Ricordiamo la descrizione euristica delle equazioni di Einstein che ho dato in precedenza:

Membro di sinistra
(**curvatura**)

=

Membro di destra
(**materia ed energia**)

Il membro di sinistra di quest'equazione fissa la geometria dello spazio-tempo. Il membro di destra fissa la distribuzione della materia e dell'energia. In generale noi chiederemmo: per una distribuzione data della materia e dell'energia, quale sarà la curvatura dello spazio risultante? Ma possiamo anche calcolare nella direzione opposta: per una qualsiasi geometria dello spazio data, compresa quella con «curve di tipo tempo chiuse» – ossia con i «loop di causalità» che ti permettono di tornare al tuo punto di partenza nello spazio e nel tempo, come il circolo chiuso in cui l'*Enterprise* rimase presa prima, durante e dopo la collisione con la *Bozeman* – le equazioni di Einstein ti dicono con precisione quale distribuzione di materia ed energia dev'essere presente. In linea di principio puoi quindi progettare qualsiasi tipo di universo desideri visitare nei tuoi viaggi nel tempo; le equazioni di Einstein ti diranno quale distribuzione di materia ed energia si richieda. La domanda chiave diventa quindi, semplicemente: una tale distribuzione di materia ed energia è fisicamente possibile?

Abbiamo già visto come emerga questa domanda nel contesto dei tunnel spaziali. I tunnel stabili richiedono una materia esotica con energia negativa. La soluzione della macchina del tempo di Kurt Godei nella relatività generale implica un universo con una densità d'energia uniforme costante e con pressione zero che ruota ma non si espande. Più recentemente qualcuno ha mostrato che una macchina del tempo implicante «stringhe cosmiche» richiede una configurazione a energia negativa. Negli ultimi tempi è stato in effetti dimostrato che nella relatività generale qualsiasi configurazione di materia in grado di permettere viaggi nel tempo deve implicare tipi di materia esotici con energia negativa osservabili da almeno un osservatore.

È interessante notare che quasi tutti gli episodi di *Star Trek* in cui compaiono viaggi nel tempo o distorsioni temporali implicano anche qualche forma catastrofica di liberazione di energia, di solito associata a un guasto nel nocciolo del motore di curvatura. Per esempio, il circolo chiuso della causalità temporale in cui l'*Enterprise* rimase intrappolata si manifestò solo dopo (anche se i concetti di «prima» e «dopo» perdono il loro significato in un circolo chiuso della causalità) una collisione con la *Bozeman,* che causò appunto un tale guasto nel motore di curvatura, provocando in tal modo la distruzione dell'*Enterprise,* una serie di eventi che continuarono a ripetersi fino a quando, in un ciclo, l'equipaggio riuscì a evitare la collisione. Anche il momentaneo arresto del tempo a bordo dell'*Enterprise,* scoperto da Picard, Data, Troi e La Forge nell'episodio *Frammenti di tempo,* pare sia dovuto a un inizio di avaria del nocciolo del motore di curvatura, combinato a un'avaria del nocciolo del motore a bordo di una vicina nave romulana. In *Tempo al quadrato,* un vasto «vortice di energia» respinge Picard indietro nel tempo. Nell'esempio originario di viaggio nel tempo di *Star Trek, Al di là del tempo,* l'*Enterprise* fu spinta indietro di tre giorni dopo un'implosione del nocciolo del motore di curvatura. E la mastodontica

distorsione spazio-temporale nell'ultimo episodio della serie *The Next Generation,* che si propaga a ritroso nel tempo e minaccia di inghiottire l'intero universo, fu causata dall'esplosione simultanea di tre diverse versioni temporali dell'*Enterprise,* che conversero nello stesso punto nello spazio. E nella serie *Enterprise,* durante la Guerra fredda temporale, la distorsione dello spazio tempo causata da un viaggiatore nel tempo del XXXI secolo, il membro dell'equipaggio dell'*Enterprise* Daniels, quando viaggiando a ritroso nel tempo trasportò il capitano Archer nell'anno 1944, è abbastanza violenta da causare la morte dello stesso Daniels; ma quando si riesce a ripristinare una nuova linea temporale, Daniels può tornare «indietro» nel futuro.

I viaggi nel tempo nell'universo reale, come nell'universo di *Star Trek,* sembrano quindi dipendere dalla possibilità di configurazioni esotiche della materia. Qualche civiltà aliena abbastanza avanzata potrebbe costruire un tunnel stabile? Oppure possiamo esaminare *tutte* le distribuzioni di massa che potrebbero condurre al viaggio nel tempo, e poi escluderle, nel loro insieme, «per ragioni fisiche», come avrebbe voluto Einstein? A tutt'oggi non siamo in grado di rispondere a questa domanda. Qualcuno ha mostrato che alcune macchine del tempo specifiche – come quella di Godei e il sistema fondato sulle stringhe cosmiche – non hanno una realtà fisica. Benché i viaggi temporali attraverso tunnel spaziali non siano ancora stati esclusi definitivamente, ricerche preliminari inducono a ritenere che le fluttuazioni quantiche della gravità possono causare l'autodistruzione dei tunnel prima che essi possano condurre a viaggi nel tempo.

Finché non avremo una teoria della gravità quantistica, è probabile che il problema dei viaggi nel tempo sia destinato a rimanere non risolto. Tuttavia vari individui coraggiosi, fra cui Stephen Hawking, hanno già scoperto le loro carte. Hawking è convinto che le macchine del tempo siano impossibili a causa degli ovvi paradossi che potrebbero derivarne, e ha proposto una «congettura per la protezione della cronologia», ossia: «Le leggi della fisica non permettono l'apparizione di curve di tipo tempo chiuse». O forse, se Hawking fosse in errore e le leggi della fisica non escludessero il cambiamento di cronologie, potremmo contare su leggi, come il futuro Accordo temporale rivelato nella serie *Enterprise,* fatte da specie intelligenti per evitare di interferire col passato.

Io sono personalmente incline a concordare in questo caso con Hawking. La fisica non tiene però conto delle nostre preferenze. Come ho già detto, spesso la relatività generale si fa beffe delle nostre ingenue attese. Come monito vorrei citare due precedenti storici. A quanto so, in almeno due occasioni teorici eminenti hanno sostenuto che un fenomeno proposto nella relatività generale dovrebbe essere rifiutato in quanto le leggi della fisica lo proibiscono:

1. Quando il giovane astrofisico Subrahmanyan Chandrasekhar avanzò l'ipotesi che i nuclei stellari di massa superiore a 1,4 volte la massa del Sole non possono, dopo aver bruciato tutto il loro combustibile nucleare, attestarsi nella fase di nane bianche, ma devono proseguire il collasso a opera della gravità, l'eminente fisico Sir Arthur Eddington rifiutò pubblicamente tale ipotesi, dicendo: «Vari fatti più o meno accidentali possono intervenire a salvare la stella, ma io vorrei una protezione meno precaria. Penso che dovrebbe esserci una legge di natura a impedire alla stella di comportarsi in un modo così assurdo!» A quel tempo gran parte della comunità degli astrofisici si schierò dalla parte di Eddington. Mezzo secolo dopo Chandrasekhar divise per le sue intuizioni, che sono state verificate da molto tempo, un premio Nobel per la fisica con William A. Fowler.
2. Poco più di vent'anni dopo il rifiuto dell'ipotesi di Chandrasekhar da parte di Eddington, un fatto molto simile accadde a una conferenza di fisica a Bruxelles. L'eminente fisico teorico americano e padre della bomba atomica J. Robert Oppenheimer aveva calcolato che oggetti noti come stelle di neutroni – i residui di supernovae, ancora più densi delle nane bianche – non potevano superare il doppio della massa solare senza collassare ulteriormente a formare quello che noi oggi chiameremmo un buco nero. Il fisico altrettanto eminente John Archibald Wheeler sostenne che questo risultato era impossibile, esattamente per la stessa ragione addotta in precedenza da Eddington per rifiutare la tesi di Chandrasekhar: le leggi della fisica dovevano in qualche modo proteggere i corpi celesti da una sorte tanto assurda. Entro un decennio Wheeler avrebbe apertamente capitolato e, per una curiosa ironia, sarebbe diventato famoso come colui che diede ai buchi neri il loro nome.

4. Data interrompe la partita

“Mi spinsi nel futuro quanto mai occhio umano,
le meraviglie vidi di quel mondo lontano.”
Alfred Tennyson, *Locksley Hall*
(versi mandati nello spazio
a bordo della nave spaziale *Voyager)*

SIA che il futuro di *Star Trek* possa comprendere o no un tunnel spaziale stabile, e sia che l’equipaggio dell’*Enterprise* abbia potuto o no viaggiare indietro nel tempo recandosi nella San Francisco dell’Ottocento, le poste in gioco in questa partita di poker cosmica derivano da una delle prime domande che ci hanno indotti a prendere in esame il problema dello spazio-tempo curvo: è possibile un motore di curvatura? Se infatti escludiamo la possibilità improbabile che la nostra Galassia sia traforata da tunnel spaziali, dalle nostre discussioni precedenti risulta abbondantemente chiaro che, in assenza di qualcosa di simile al motore di curvatura, la maggior parte della Galassia resterà sempre fuori della nostra portata. È venuto finalmente il momento di affrontare quest’arduo problema. La risposta è un sonante «forse!»

Ancora una volta ci è d’aiuto la perspicacia linguistica degli autori di *Star Trek.* Abbiamo già visto come nessun meccanismo di propulsione a razzo possa forzare i tre blocchi posti al volo interstellare dalla relatività ristretta: 1) nulla può viaggiare a velocità superiori a quella della luce nel vuoto; 2) gli orologi trasportati da oggetti che viaggiano a velocità prossime a quella della luce sono rallentati; 3) quand’anche un razzo potesse accelerare un veicolo spaziale fino a velocità prossime a quella della luce, le richieste di propellente sarebbero proibitive.

L’idea è quella di non far ricorso per la propulsione ad alcun tipo di razzo, ma di servirsi invece dello spazio-tempo stesso, incurvandolo. La relatività generale ci chiede di essere un po’ più precisi nelle nostre asserzioni sul moto. Invece di dire che niente può superare la velocità della luce, dobbiamo dire che niente può viaggiare *localmente* a velocità superiori a quella della luce. Ciò significa che niente può viaggiare più velocemente della luce *in riferimento a marcatori locali di distanze.* Se però lo spazio-tempo è incurvato, i marcatori di distanze locali non funzionano di necessità anche a livello globale.

Vorrei considerare come esempio l’universo stesso. La relatività ristretta ci dice che tutti gli osservatori in quiete rispetto al loro ambiente locale avranno orologi che segnano il tempo con lo stesso passo. Perciò, mentre viaggiamo nell’universo, possiamo fermarci periodicamente e situare orologi a intervalli regolari nello spazio, aspettandoci che segnino tutti lo stesso tempo. La relatività generale non modifica questo risultato. Gli orologi localmente in quiete segneranno tutti lo stesso tempo. La relatività generale permette però allo stesso spazio-tempo di espandersi. Gli oggetti che si trovano in regioni diametralmente opposte dell’universo osservabile si allontanano gli uni dagli altri a una velocità quasi pari a quella della luce, rimanendo tuttavia in quiete rispetto al loro ambiente locale. In effetti, se l’universo si espande uniformemente e se è grande abbastanza – due cose che sembrano essere entrambe vere –, esistono oggetti che non possiamo ancora vedere, i quali si allontanano in questo stesso momento da noi a una velocità superiore a quella della luce, anche se ogni civiltà in tali lontane regioni dell’universo può essere localmente in quiete rispetto al proprio ambiente.

La curvatura dello spazio produce perciò un buco negli argomenti della relatività ristretta: un buco abbastanza grande da permettervi il passaggio di una nave spaziale della Federazione. Se è possibile manipolare lo spazio-tempo stesso, oggetti in moto a velocità localmente molto basse potrebbero, in conseguenza di un’espansione o contrazione dello spazio, percorrere distanze immense in piccoli intervalli di tempo. Abbiamo già visto come una manipolazione estrema – una sorta di operazione di «taglia e incolla» di parti lontane dell’universo in un tunnel spaziale – potrebbe creare scorciatoie nello spazio-tempo. Quel che si sostiene qui è che il viaggio a velocità superiori a quella della luce potrebbe essere globalmente, pur se non localmente, possibile, anche senza far ricorso a una tale sorta di chirurgia.

Una dimostrazione in linea di principio di quest’idea è stata sviluppata recentemente dal fisico Miguel Alcubierre in Galles. Alcubierre decise di esplorare se non si potesse derivare, nella cornice della relatività generale, una soluzione consistente che corrispondesse ai «viaggi a velocità curvatura». Egli riuscì a dimostrare la possibilità di creare una configurazione dello spazio-tempo in cui un veicolo spaziale possa viaggiare fra due punti in un tempo arbitrariamente breve. Inoltre, nel corso di tutto il viaggio il veicolo spaziale potrebbe muoversi rispetto al suo ambiente locale a una velocità molto inferiore a quella della luce, così che gli orologi a bordo resterebbero sincronizzati con quello del luogo d’origine e della destinazione. Pare che la relatività generale ci permetta questo lusso.

L’idea è semplice. Se si potesse incurvare localmente lo spazio-tempo, in modo da farlo espandere dietro a un’astronave e farlo contrarre davanti a essa, il veicolo sarebbe spinto in avanti assieme allo spazio in cui si trova, come una tavola da surf su un’onda. Esso non viaggerebbe mai localmente a una velocità superiore a quella della luce, perché anche la luce sarebbe

trasportata assieme all'onda in espansione dello spazio.

Per farci un'idea più precisa del funzionamento di questo meccanismo, immaginiamo di trovarci sull'astronave. Se lo spazio si espande improvvisamente di una grande quantità dietro di noi, troveremo che la base stellare che abbiamo lasciato solo pochi minuti fa si trova ora a una distanza di molti anni-luce. Similmente, se lo spazio si contrae davanti a noi, troveremo che la base stellare verso cui siamo diretti, che si trovava in precedenza a una distanza di alcuni anni-luce, è ora molto vicina, raggiungibile in pochi minuti con la normale propulsione a razzo.

In questa soluzione è possibile inoltre disporre la geometria dello spazio-tempo in modo tale che gli immensi campi gravitazionali necessari per espandere e contrarre in questo modo lo spazio non siano mai grandi in prossimità della nave e delle basi. Qui lo spazio può essere quasi piatto, e perciò gli orologi sulla nave e nelle basi stellari rimangono sincronizzati. Da qualche parte fra la nave e le basi, le forze di marea dovute alla gravità saranno immense, ma ciò non ci crea alcun inconveniente se noi non ci troviamo in tale regione. Avevano forse in mente questo scenario gli autori di *Star Trek* quando inventarono il motore di curvatura, anche se esso ha poca somiglianza con le descrizioni tecniche che ce ne sono state fornite. Questo motore soddisfa tutte le richieste che abbiamo elencato in precedenza in vista di viaggi spaziali interstellari soggetti a un controllo soddisfacente: 1) velocità superiore a quella della luce; 2) senza dilatazione del tempo, e 3) senza ricorso alla propulsione a razzo. Ovviamente, finora abbiamo eluso un problema piuttosto grande. Rendendo dinamico lo spazio-tempo stesso, la relatività generale permette la creazione di «spazi-tempi su misura», nei quali è possibile quasi ogni tipo di moto nello spazio e nel tempo. Il costo di questa soluzione consiste però nel fatto che questi spazi-tempi sono connessi a una qualche distribuzione sottostante della materia e dell'energia. Perché lo spazio-tempo desiderato sia «fisico», occorre dunque che si possa conseguire la distribuzione richiesta della materia e dell'energia. Torneremo fra poco su questo problema.

Anzitutto, però, l'aspetto meraviglioso di tali «spazi-tempi su misura» è quello di permetterci di tornare alla sfida originaria di Newton e di creare ammortizzatori inerziali e raggi traenti. L'idea è identica a quella del motore di curvatura. Se si può incurvare lo spazio-tempo attorno alla nave, degli oggetti possono allontanarsi fra loro senza sperimentare quel senso di accelerazione locale che, come il lettore ricorderà, era il gravissimo inconveniente della situazione newtoniana.

Per evitare le enormi accelerazioni richieste per raggiungere grandi velocità – anche inferiori a quella della luce – con motori a impulso, si deve far ricorso agli stessi espedienti che per viaggiare a velocità curvatura. La distinzione fra motore a impulso» e motore di curvatura viene così attenuata. Similmente, per usare un raggio traente allo scopo di trainare un oggetto pesante come un pianeta, si deve semplicemente espandere lo spazio dall'altro lato del pianeta e contrarlo dal lato vicino. Semplice!

La curvatura dello spazio presenta anche altri vantaggi. È chiaro che, se lo spazio-tempo viene fortemente incurvato davanti all'*Enterprise,* ogni raggio di luce – o anche ogni raggio faser – sarà deviato prima di colpire la nave. Questo è senza dubbio il principio che si cela dietro gli scudi deflettori. Gli autori di *Star Trek* ci dicono in effetti che gli scudi deflettori operano per mezzo di un'«emissione coerente di gravitoni». Poiché i gravitoni sono per definizione particelle che trasmettono la forza di gravità, l'«emissione coerente di gravitoni» non è altro che la creazione di un campo gravitazionale coerente. Un campo gravitazionale coerente è, nel linguaggio moderno, proprio ciò che incurva lo spazio! Così, ancora una volta, gli autori di *Star Trek* hanno imbroccato il linguaggio giusto.

Io immagino che il dispositivo di occultamento dei Romulani potrebbe funzionare in un modo simile. In effetti un'*Enterprise* che abbia alzato il suo scudo deflettore dovrebbe risultare occultata. Dopo tutto, quando vediamo qualcosa che non risplende di luce propria, lo vediamo in virtù della luce che riflette, che arriva al nostro occhio. Il dispositivo di occultamento dovrebbe incurvare in qualche modo lo spazio, così che i raggi di luce incidenti si flettono attorno a un Falco da guerra anziché esserne riflessi. Cosa interessante, vari ricercatori americani hanno investigato un tipo di dispositivo di occultamento per aerei, che li celi almeno ai radar. Quest'apparecchiatura riflette e deflette le onde radio incidenti sul contorno dell'aereo usando non la gravità bensì interazioni elettromagnetiche. Una cosa del genere è possibile se si mira a manipolare solo un tipo specifico di radiazione, come le onde radio. Purtroppo, per deflettere in modo uniforme tutti i tipi di radiazione, si deve ricorrere alla gravità. La distinzione fra questo meccanismo e la deflessione dei raggi di luce dall'*Enterprise* è quindi molto sottile. In tale ambito, una domanda che diede molto da pensare a molti trekker fino alla trasmissione dell'episodio *The Pegasus,* della serie *The Next Generation,* fu perché la Federazione non usasse la tecnologia di occultamento. Alla luce di quanto abbiamo detto sopra, qualsiasi civiltà in grado di sviluppare scudi deflettori sembrerebbe in grado di creare dispositivi di occultamento. Come abbiamo infine appreso in *The Pegasus,* la Federazione fu limitata nel suo sviluppo di dispositivi di occultamento da trattati politici più che dalla tecnologia richiesta. (In effetti, come si è chiarito in *Ieri, oggi e domani,* l'ultimo episodio della serie *The Next Generation,* pare che la Federazione abbia infine permesso l'uso di dispositivi di occultamento sulle navi spaziali.) E chiaramente la Coalizione dei Pianeti era stata in grado

di manipolare la gravità già fin dal tempo della prima *Enterprise* la quale, non solo era in grado di muoversi a velocità curvatura, ma aveva anche generatori di gravità artificiale in grado di produrre in ogni astronave un *sweet spot* (un punto felice) dove la gravità permette di sedersi sul soffitto, almeno secondo il guardiamarina Mayweather.

Infine, data questa visione del motore di curvatura in connessione con la relatività generale, le velocità curvatura assumono un significato un po' più concreto: esse sarebbero correlate al fattore di contrazione e di espansione del volume di spazio davanti e dietro la nave. Le convenzioni sulle velocità curvatura non sono mai state particolarmente stabili: fra la prima e la seconda serie, Gene Roddenberry decise a quanto pare che le velocità curvatura dovessero essere ricalibrate in modo che nulla potesse superare la curvatura 10. Ciò significa che la velocità curvatura non potrebbe essere una semplice scala logaritmica, così che, per esempio, la curvatura 10 fosse 210 = 1024 x velocità della luce. Secondo il *Next Generation Technical Manual,* la curvatura 9,6 (*warp* 9.6), che è la velocità più alta considerata normale per l'*EnterpriseD,* è uguale a 1909 x velocità della luce, e la curvatura 10 è infinita. È interessante notare che, nonostante questa ricalibrazione, vengono avvistati periodicamente oggetti (come il cubo di Borg) che viaggiano a velocità superiori a curvatura 10, cosicché suppongo che non ci si dovrebbe preoccupare troppo di comprendere correttamente i particolari.

Tanto basti per le buone notizie…

Avendo accettato il motore di curvatura come una cosa non impossibile (almeno in linea di principio), dobbiamo infine affrontarne le conseguenze per il membro di destra delle equazioni di Einstein, ossia per la distribuzione della materia e dell'energia richiesta per produrre la curvatura voluta dello spazio-tempo. E, indovinate un po', la situazione è quasi *peggiore* che per i tunnel spaziali. Gli osservatori che viaggiano ad alta velocità in un tunnel possono misurare un'energia negativa. Per il tipo di materia necessario per produrre una propulsione curvatura, persino un osservatore in quiete rispetto alla nave spaziale – cioè qualcuno a bordo – misurerà un'energia negativa.

Questo risultato non è troppo sorprendente. A un qualche livello, le soluzioni esotiche della relatività generale richieste per mantenere aperti i tunnel spaziali, per permettere di viaggiare nel tempo e per rendere possibile il motore di curvatura implicano tutte che a qualche scala la materia debba respingere gravitazionalmente altra materia. Nella relatività generale c'è un teorema secondo cui questa condizione equivarrebbe in generale a richiedere che l'energia della materia sia negativa per qualche osservatore.

Quel che *è* forse sorprendente è il fatto, menzionato in precedenza, che la meccanica quantistica, quando viene combinata con la relatività ristretta, implica che almeno a scale microscopiche la distribuzione locale di energia possa essere negativa. In effetti, come ho notato nel capitolo 3, le fluttuazioni quantiche hanno spesso questa proprietà. Il problema chiave, che a tutt'oggi non ha ancora trovato una soluzione, è se le leggi della fisica come le conosciamo noi permetteranno alla materia di avere questa proprietà su scala macroscopica. È certamente vero che noi oggi non abbiamo la minima idea di come si potrebbe creare una tale materia in un modo fisicamente realistico. Cosa interessante, dopo l'uscita della prima edizione di questo libro ci si è resi conto che la natura stessa ha dotato lo spazio vuoto di un tipo di energia gravitazionalmente repulsivo. Pare che l'energia dominante nell'universo sia l'energia dello spazio vuoto, la quale è circa tre volte maggiore di tutta l'energia contenuta in tutte le galassie e gli ammassi dell'universo. Se l'espansione dell'universo va accelerando, e non rallentando come si pensava in passato, lo si deve a quest'«energia oscura», com'è nota oggi, il cui comportamento è simile a quello della famosa «costante cosmologica», introdotta nel 1916 da Einstein e da lui rifiutata qualche anno dopo. Noi attualmente non abbiamo idea del perché esista quest'energia oscura, o di quale sia la sua origine. Sappiamo però che se essa è effettivamente l'energia dello spazio vuoto, che la meccanica quantistica ammette sia diversa da zero e che non esiste alcun modo per indurla a compiere qualche lavoro utile, per esempio nella propulsione di veicoli spaziali.

Ignoriamo tuttavia per il momento i potenziali ostacoli, e supponiamo che un giorno diventi possibile creare materia esotica, usando una qualche ingegneria quantomeccanica avanzatissima della materia e dello spazio vuoto. Anche ammessa questa possibilità, le richieste di energia per compiere ognuno dei notevoli giochi con lo spazio-tempo qui descritti farebbero probabilmente sembrare ben poca cosa la potenza richiesta per conseguire accelerazioni a velocità d'impulso. Consideriamo la massa del Sole, che è un milione di volte circa maggiore della massa della Terra. Il campo gravitazionale alla superficie del Sole è in grado di far deviare la traiettoria della luce di meno di un millesimo di grado. Immaginiamo quali campi gravitazionali estremi debbano essere generati nei pressi di una nave spaziale per deflettere un raggio faser in arrivo di 90°! (Questa è una delle ragioni principali per cui il famoso «effetto fionda» – usato per la prima volta nell'episodio classico *Domani è ieri* per mandare l'*Enterprise* indietro nel tempo, ripreso in *Star Trek TV: Rotta verso la Terra,* e menzionato anche nell'episodio della serie *The Next Generation, Tempo al quadrato* – è del tutto impossibile. Il campo gravitazionale nei pressi della superficie del Sole non ha alcuna rilevanza per il tipo di effetti gravitazionali che si richiedono per perturbare lo spazio-tempo nei modi qui considerati.) Un modo per stimare quanta energia si dovrebbe generare è quello di immaginare di produrre un buco nero della grandezza dell'*Enterprise,* dal momento che un buco nero di questa grandezza sarebbe

certamente in grado di deflettere in misura significativa qualsiasi raggio di luce che passasse nelle sue vicinanze. La massa di un tale buco nero sarebbe il 10 per cento circa della massa del Sole. Per esprimerci in unità di energia, la creazione di un tale buco nero richiederebbe una quantità di energia superiore all'energia totale prodotta dal Sole in tutta la sua vita.

A che punto ci troviamo dunque alla fine di questa partita? Sappiamo abbastanza sulla natura dello spazio-tempo per descrivere esplicitamente come si potrebbe utilizzare, almeno in linea di principio, lo spazio curvo per conseguire molti degli elementi essenziali del viaggio spaziale interstellare al modo di *Star Trek.* Sappiamo che, in assenza di tali possibilità esotiche, probabilmente non potremo mai viaggiare attraverso la Galassia. D'altro canto non abbiamo idea se le *condizioni fisiche* richieste per conseguire tali risultati siano realizzabili in pratica o anche solo permesse in via teorica. È chiaro, infine, che, se queste risposte fossero affermative, per realizzare tali possibilità una civiltà dovrebbe essere in grado di controllare energie molto superiori a qualsiasi quantità di energia che possiamo immaginare oggi.

Suppongo che si potrebbe adottare l'opinione ottimistica che queste meraviglie veramente notevoli non siano impossibili, almeno *a priori.* Esse dipendono semplicemente da una possibilità remota: la capacità di creare e rinnovare materia ed energia esotiche. Ci sono ragioni per sperare, ma devo ammettere che rimango scettico. Come il mio collega Stephen Hawking, credo che i paradossi in gioco nei viaggi di andata e ritorno nel tempo li facciano escludere per qualsiasi teoria fisica ragionevole. Poiché per i viaggi a velocità curvatura e per gli scudi deflettori si richiedono virtualmente le stesse condizioni di energia e di materia, non prevedo che si possano realizzare nemmeno questi, anche se in precedenza mi è già accaduto di sbagliare alcune previsioni.

Tuttavia sono ancora ottimista. Quel che per me merita davvero di essere celebrato è il corpus notevole di sapere che ci ha portati su questa soglia affascinante. Noi viviamo in un cantuccio remoto di una delle 100 miliardi di galassie esistenti nell'universo osservabile. E come minuscoli insetti su un loglio di gomma, viviamo in un universo la cui vera forma rimane nascosta alla nostra vista. Eppure, nel corso di meno di venti generazioni – da Newton a oggi – abbiamo utilizzato le semplici leggi della fisica per illuminare le profondità dello spazio e del tempo. Forse non potremo mai salire a bordo di astronavi in partenza verso le stelle, ma, pur essendo reclusi su questo minuscolo pianeta azzurro siamo riusciti a investigare il cielo notturno e a svelarne grandi meraviglie, e molte altre senza dubbio ne scopriremo. Se la fisica non può darci ciò di cui abbiamo bisogno per vagare nella Galassia, ci dà ciò di cui abbiamo bisogno per portare la Galassia fino a noi.

Sezione seconda:
materia, materia dappertutto

In cui il lettore esplora dispositivi di teletrasporto, motori di curvatura, cristalli di dilitio, motori a materia-antimateria e il ponte ologrammi.

5. Atomi o bit

"Reginald, il teletrasporto è il modo più sicuro per viaggiare."
Geordi La Forge al tenente Reginald Barclay, in Paure nascoste

La vita imita l'arte. Negli ultimi tempi continuo a sentir ripetere la stessa domanda: «Atomi o bit: dove sta il futuro?» Trent'anni fa Gene Roddenberry si pose lo stesso problema, spinto da un altro imperativo. Egli aveva un bel progetto di astronave, con un piccolo problema: come un pinguino in acqua, l'*Enterprise* poteva scivolare elegantemente nelle profondità dello spazio, ma come un pinguino a terra avrebbe avuto problemi a muoversi al suolo se mai avesse tentato di atterrare. Fatto forse più importante, gli scarsi fondi a disposizione per un programma televisivo settimanale impedivano di far atterrare una grande astronave ogni settimana.

Come risolvere quindi questo problema? Semplice: assicurandosi che l'astronave non dovesse mai atterrare. Si doveva trovare qualche altro modo per spostare i membri dell'equipaggio dalla nave spaziale alla superficie di un pianeta. Prima ancora di avere il tempo di dire: «Mi faccia risalire» il teletrasporto era nato.

Forse nessun altro tipo di tecnologia, tranne il motore di curvatura, ricorre più spesso in ogni missione delle navi spaziali della Federazione. E anche chi non ha mai guardato un episodio di *Star Trek* riconosce la magica espressione appena citata. Essa ha permeato la cultura popolare americana. Recentemente ho sentito parlare di un giovane che, guidando in stato di ebbrezza, era passato col rosso incappando proprio in una macchina della polizia. All'udienza il giudice gli domandò se avesse qualcosa da dire. Il giovane, disperalo, rispose: «Sì, vostro onore», e alzatosi in piedi estrasse il portafogli, lo aprì e mormorò dentro di esso: «Scotty, mi faccia risalire!»

Quest'episodio è probabilmente apocrifo, ma testimonia l'impatto che quest'ipotetica tecnologia ha avuto sulla nostra cultura: un impatto tanto più notevole in quanto probabilmente nessun altro elemento della tecnologia fantascientifica a bordo dell'*Enterprise è* così poco plausibile. Per creare un dispositivo come il teletrasporto si dovrebbero risolvere più problemi di tipo pratico e teorico di quanti il lettore potrebbe immaginare. Le difficoltà implicano l'intero spettro della fisica e della matematica, comprese la teoria dell'informazione, la meccanica quantistica, la relazione di massa ed energia di Einstein, la fisica delle particelle elementari ed altre cose ancora.

Tutto questo ci riporta alla contrapposizione di atomi e bit. Il problema chiave che il teletrasporto ci costringe ad affrontare è il seguente: qual è il modo più rapido e più efficiente per spostare, dalla nave alla superficie di un pianeta, circa 10^{28} (1 seguito da 28 zeri) atomi di materia combinati in una configurazione complessa a comporre un singolo essere umano? Questa domanda viene proprio a proposito, dato che noi affrontiamo esattamente la stessa difficoltà quando consideriamo come distribuire nel modo migliore la configurazione complessa di circa 10^{26} atomi in un libro medio in brossura. Quando scrivevo la prima edizione di questo libro, questa era solo un'idea vaga, mentre oggi è un fatto comune trovare libri in cui gli atomi stessi sono ritenuti secondari. Quel che importa di più sono i bit.

Consideriamo, per esempio, un libro di una biblioteca. Una biblioteca compra una copia – o, nel caso di un autore fortunato, varie copie – di un libro, che vengono riposte sui suoi scaffali e prestate ognuna a un lettore per volta. In una biblioteca digitale le stesse informazioni possono essere conservate sotto forma di bit. Un bit è un 1 o uno 0; i bit vengono combinati in gruppi di otto, chiamati byte, per rappresentare lettere o numeri. Il contenuto di un libro viene registrato nei nuclei magnetici della memoria di computer, nei quali ogni bit è rappresentato o da una regione magnetizzata (1) o da una regione non magnetizzata (0). Ora, un numero arbitrariamente grande di utenti può avere accesso alla medesima locazione di memoria su un computer essenzialmente nello stesso tempo, cosicché in una biblioteca digitale ogni singola persona sulla Terra che potrebbe altrimenti trovarsi nella necessità di comprare un libro può leggerlo da una singola fonte. In questo caso, chiaramente, è meno importante, e senza dubbio meno efficiente, avere a disposizione gli atomi reali che compongono il libro che non poter registrare i bit (anche se questo sistema può essere disastroso per i diritti d'autore).

E nel caso di persone? Volendo teletrasportare delle persone da un posto all'altro, si devono spostare i loro atomi o solo la loro informazione? A prima vista si potrebbe pensare che sia molto più facile spostare il contenuto d'informazione; fra l'altro l'informazione può viaggiare alla velocità della luce. Nel caso delle persone ci sono però due problemi che non si pongono nel caso dei libri; innanzitutto si deve estrarre l'informazione, che non è una cosa tanto facile; e poi la si deve ricombinare con della materia. Dopo tutto le persone, diversamente dai libri, richiedono gli atomi.

Non sembra che gli autori di *Star Trek* abbiano mai capito chiaramente che cosa vogliono che faccia il teletrasporto. Deve trasmettere gli atomi *e* i bit, o solo i bit? Il lettore potrebbe domandarsi perché faccio quest'osservazione, dal momento

che il *Next Generation Technical Manual* descrive il processo nei particolari: innanzitutto il teletrasporto si aggancia sul bersaglio. Poi analizza l'immagine da trasportare, la «smaterializza», la tiene per un po' in un «buffer degli schemi» e poi trasmette a destinazione il «flusso di materia», contenuto in un «fascio di confinamento anulare». Pare quindi che il teletrasporto trasmetta la materia assieme all'informazione.

L'unica difficoltà in questo quadro è che è in disaccordo con ciò che a volte fa il teletrasporto. In almeno due casi ben noti, il tele trasporto aveva cominciato con una persona e ne fece salire due. Nel famoso episodio classico *Il duplicato,* un cattivo funzionamento del teletrasporto divide Kirk in due versioni diverse di se stesso, una buona e una cattiva. In uno sviluppo più interessante, e permanente, nell'episodio *Il Duplicato,* della serie *The Next Generation,* scopriamo che il tenente Riker era stato diviso in due copie durante il trasporto dal pianeta Nervala IV alla *Potemkin.* Una copia era poi tornata sana e salva alla *Potemkin,* mentre l'altra era stata riflessa di nuovo sul pianeta, dove Riker aveva vissuto da solo per otto anni.

Se il teletrasporto trasmette sia il flusso materiale sia il segnale d'informazione, questo fenomeno di divisione è impossibile. Il numero di atomi finale sarà uguale al numero iniziale. Non c'è alcuna possibilità di costruire repliche di persone in questo modo. Se invece si trasmette solo l'informazione, si può immaginare di ricombinarla con atomi che potrebbero essere immagazzinati sulla nave, e formare quante copie si vogliono di un individuo.

Un problema simile concernente il flusso materiale ci si pone quando consideriamo la sorte di oggetti irradiati nello spazio nella forma di «energia pura». Per esempio, nell'episodio *Solo in mezzo a noi* della serie *The Next Generation,* Picard decide a un certo punto di farsi irradiare nello spazio come energia pura, libera dai vincoli della materia. Dopo che questa si è rivelata un'esperienza terribile e pericolosa, egli riesce a farsi ricuperare, e la sua forma corporea viene ricostruita grazie alle informazioni contenute nel buffer degli schemi. Se però fosse stato irradiato nello spazio il flusso materiale, alla fine non ci sarebbe stato più niente da ricostruire.

Così, nonostante quanto dice il manuale di *Star Trek,* io vorrei adottare qui un punto di vista agnostico ed esplorare invece la miriade di problemi e di sfide associati a ognuna delle due possibilità: il trasporto degli atomi o dei bit.

Quando un corpo è senza corpo

La domanda forse più affascinante sul teletrasporto – che di solito non viene neppure posta – è: da che cosa è composto un essere umano? Noi siamo semplicemente la somma di lutti i nostri atomi? Più precisamente, se io riuscissi a ricreare ogni atomo del tuo corpo, esattamente nello stesso stato di eccitazione chimica in cui i tuoi atomi si trovano in questo momento, produrrei una persona funzionalmente identica, che ha esattamente tutti i tuoi ricordi, le tue speranze, i tuoi sogni, il tuo spirito? C'è ogni ragione di attendersi che sarebbe così, ma vai la pena di notare che questo modo di prospettare le cose è in contraddizione con la fede condivisa da molte persone nell'esistenza di un'«anima» in qualche modo distinta dal proprio corpo. Che cosa accade quando si muore? Molte religioni non ritengono forse che l'«anima» possa continuare a esistere anche dopo la morte? In questo senso, il teletrasporto sarebbe un mirabile esperimento sulla spiritualità. Se una persona venisse teletrasportata a bordo dell'*Enterprise* e rimanesse intatta e visibilmente immutata, fornirebbe una prova vistosa del fatto che un essere umano non è nulla di più della somma delle sue parti, e questa dimostrazione contraddirebbe una quantità di credenze spirituali.

Questo problema è, per ovvie ragioni, accuratamente evitato in *Star Trek.* Tuttavia, nonostante la natura puramente fisica del processo di smaterializzazione e trasporto, la nozione che oltre i confini del corpo esista una qualche nebulosa «forza vitale» è un tema costante nella serie. La premessa del secondo e del terzo film di *Star Trek, L'ira di Khan* e *Alla ricerca di Spock,* è che almeno Spock abbia un «katra» – uno spirito vivente – che può esistere separato dal corpo. Più recentemente, nell'episodio *Intruso a bordo,* della serie *Voyager,* l'«energia neurale», affine a una forza vitale, di Chakotay è rimossa da lui e vaga da una persona all'altra nella nave spaziale nel tentativo di tornare nella sua «dimora» iniziale. Non penso che si possa tenere il piede in due scarpe. O l'«anima», il «katra», la «forza vitale», o comunque la si voglia chiamare, fa parte del corpo, e noi non siamo altro che il nostro essere materiale, o no. Non volendo offendere la sensibilità religiosa di qualcuno, fosse pure un vulcaniano, io rimarrò neutrale in questa controversia. Credo tuttavia che, prima di procedere oltre, valga la pena di sottolineare che non si deve considerare alla leggera neppure la premessa fondamentale del teletrasporto: che gli atomi *e* i bit esauri scano tutta la realtà.

Il problema dei bit

Molti dei problemi che esamineremo fra poco potrebbero essere evitati se si rinunciasse alla richiesta di trasportare gli atomi unitamente all'informazione. Dopo tutto, chiunque abbia accesso a Internet sa quanto sia facile trasportare un flusso di dati contenente, diciamo, il progetto dettagliato per una nuova automobile, assieme a fotografie. Assai meno facile è senza dubbio il trasporto della macchina reale da un luogo all'altro. Nel trasporto dei bit si pongono tuttavia due problemi molto difficili. Il primo è una difficoltà familiare, in cui si sono imbattute, per esempio, le ultime persone che I hanno visto Jimmy Hoffa vivo: come dobbiamo sbarazzarci del corpo? Se si deve trasportare solo l'informazione, ci si deve sbarazzare degli atomi al punto d'origine e ci si deve procurare una riserva di atomi al punto di ricezione. Questo problema è piuttosto serio. Se vuoi eliminare 1028 atomi, devi affrontare un compito alquanto difficile. Supponiamo, per esempio, che tu voglia semplicemente trasformare tutto questo materiale in energia pura. Quanta energia ne risulterebbe? Ce lo dice la formula di Einstein $E = mc^2$. Trasformando improvvisamente in energia 50 kg di materiale (un adulto della categoria minimosca), libereremmo un'energia equivalente a un po' più di mille bombe all'idrogeno di un megatone. È difficile immaginare come farlo in un modo amichevole per l'ambiente.

Questo modo di procedere comporta, ovviamente, un altro problema. Se fosse possibile risolverlo, diventerebbe banale la duplicazione di persone. Questo procedimento sarebbe in effetti molto più facile del teletrasporto, in quanto renderebbe superflua la distruzione del soggetto originario. La replica, eseguita in questo modo, di oggetti inanimati è qualcosa con cui si può convivere facilmente, e in effetti i membri degli equipaggi delle navi spaziali sembrano ben abituati a questa possibilità. La replica di esseri umani viventi creerebbe invece senza dubbio difficoltà (come nella formazione di due copie di Riker in *Il Duplicato).* In effetti, se oggi le ricerche sul DNA ricombinante hanno sollevato una quantità di problemi etici, la mente si confonde nel considerare quelli che si proporrebbero se potessimo replicare a volontà interi individui, completi di memoria e personalità. Le persone sarebbero allora assimilabili a programmi per computer, o a versioni di un libro conservate su disco. Se uno di questi venisse danneggiato o contenesse un errore, basterebbe sostituirlo con una nuova copia della versione registrata.

Va bene, teniamoci gli atomi

I ragionamenti precedenti suggeriscono che, sia per motivi pratici sia per motivi etici, potrebbe essere preferibile immaginare un teletrasporto che portasse assieme al segnale un flusso di materia, come ci dicono che fanno i dispositivi per il teletrasporto di *Star Trek.* Il problema diventa quindi: come si possono spostare gli atomi? La difficoltà risulta essere di nuovo di tipo energetico, anche se in un modo un po' più sottile. Che cosa si richiederebbe per «smaterializzare» qualcosa nel teletrasporto? Per rispondere a questa domanda, dobbiamo considerare in modo un po' più accurato una domanda più semplice: che cos'è la materia? Tutta la materia normale è formata da atomi, che a loro volta sono composti da nuclei centrali molto densi circondati da una nube di elettroni. Come potrete ricordare dai corsi di chimica o di fisica delle scuole superiori, la maggior parte del volume di un atomo è composto da spazio vuoto. La regione occupata dagli elettroni esterni è circa diecimila volte più estesa della regione occupata dal nucleo.

Perché, se gli atomi sono formati per la maggior parte da spazio vuoto, la materia non passa attraverso altra materia? La risposta è che quel che rende solido un muro non è l'esistenza delle particelle bensì quella dei campi elettrici che si estendono fra una particella e l'altra. Quando io batto una manata sul tavolo, la mia mano è fermata primariamente dalla repulsione elettrica fra gli elettroni degli atomi della mia mano e gli elettroni degli atomi che formano il tavolo, e *non* dalla mancanza di spazio fra gli elettroni.

Questi campi elettrici non solo rendono corporea la materia nel senso di impedire agli oggetti di passare l'uno attraverso l'altro, ma ne assicurano anche la coesione. Per alterare questa situazione normale, si devono perciò superare le forze elettriche che agiscono fra gli atomi. Per superare queste forze si richiede lavoro, che consuma energia. È così che funzionano in effetti le reazioni chimiche. Le configurazioni di singoli insiemi di atomi e i loro legami vengono alterati in conseguenza di scambi di energia. Per esempio, se si inietta dell'energia in un miscuglio di nitrato d'ammonio e di olio combustibile, le molecole dei due materiali possono ridisporsi, e nel corso di questo processo può essere liberata l'«energia di legame» che teneva insieme i materiali originari. Questa liberazione, se è abbastanza rapida, causerà una grande esplosione.

L'energia di legame fra gli atomi è, però, piuttosto piccola rispetto all'energia di legame delle particelle – protoni e neutroni – che compongono i nuclei atomici, che sono incredibilmente densi. Le forze che tengono assieme queste particelle in un nucleo danno energie di legame milioni di volte maggiori delle energie di legame fra gli atomi. Perciò le reazioni nucleari liberano una quantità di energia significativamente maggiore di quella liberata dalle reazioni chimiche; ecco perché le armi nucleari sono così potenti.

Infine, l'energia di legame che tiene assieme i quark – ossia le particelle elementari che formano i protoni e i neutroni stessi – è ancora maggiore di quella che assicura la coesione di protoni e neutroni nei nuclei. In effetti si ritiene, sulla base di calcoli resi possibili dalla teoria che descrive le interazioni dei quark, che per separare completamente i quark che compongono ogni protone o neutrone si richiederebbe una quantità d'energia infinita.

Sulla base di questo argomento potremmo ritenere impossibile una completa dissoluzione della materia nei quark, i suoi componenti fondamentali, e in effetti è così, almeno a temperatura ambiente. La stessa teoria che descrive le interazioni dei quark all'interno dei protoni e dei neutroni ci dice però che, se riscaldassimo i nuclei a 1000 miliardi di gradi circa (una temperatura un milione di volte maggiore di quella vigente nella regione centrale del Sole), non solo i quark che compongono i nuclei perderebbero le loro energie di legame, ma la materia perderebbe improvvisamente quasi tutta la sua massa trasformandosi in radiazione, o, nel linguaggio del nostro teletrasporto, smaterializzandosi.

Perciò tutto ciò che si deve fare per sconfiggere l'energia di legame al suo livello più fondamentale (in realtà al livello a cui si riferisce il manuale tecnico di *Star Trek)* è di riscaldarla a 1000 miliardi di gradi. In unità di energia, ciò implica che si fornisca sotto forma di calore il 10 per cento circa della massa di quiete di protoni e neutroni. Per riscaldare a tale temperatura un campione della grandezza di un essere umano occorrerebbe perciò il 10 per cento circa dell'energia richiesta per annichilare tale materiale, ossia l'energia equivalente a cento bombe all'idrogeno di un megatone.

Si potrebbe pensare, data l'enorme richiesta di energia che ho appena formulato, che lo scenario da me descritto sia quello dell'*overkill,* ossia di un potenziale atomico distruttivo molto oltre ogni limite di efficienza, ben familiare nel contesto della corsa agli armamenti. Ma forse non abbiamo bisogno di scomporre la materia fino al livello dei quark. Forse ai fini del teletrasporto potrebbe essere sufficiente una smaterializzazione al livello dei protoni e dei neutroni, o forse anche solo al livello atomico. Certamente le richieste di energia sarebbero in questo caso molto inferiori, anche se sempre grandissime. Purtroppo se, imitando la politica dello struzzo, nascondiamo questo problema sotto il tappeto, ci esponiamo a un problema ancora più grave. Una volta infatti che si sia conseguito il flusso materiale, composto ora da singoli protoni, neutroni ed elettroni, o forse interi atomi, lo si deve teletrasportare, presumibilmente a una frazione significativa della velocità della luce.

Ora, per far muovere particelle come i protoni e i neutroni a velocità prossime a quella della luce, si deve dar loro un'energia paragonabile a quella della loro massa di quiete. Questa risulta essere circa dieci volte maggiore della quantità di energia richiesta per riscaldare i protoni fino a scomporli in quark. Ma anche se occorre più energia per particella per accelerare i protoni a una velocità prossima a quella della luce, questo è tuttavia un compito più facile di quello di depositare e immagazzinare abbastanza energia all'interno dei protoni per un tempo abbastanza lungo per riscaldarli a una temperatura tale per determinarne la dissoluzione in quark. Ecco perché oggi noi possiamo costruire, sia pure a costi enormi, mastodontici acceleratori di particelle – come il Tevatron del Fermilab, a Batavia, nell'Illinois – che sono in grado di accelerare singoli protoni fino al 99,9 per cento della velocità della luce, mentre non siamo ancora riusciti a costruire un acceleratore in grado di bombardare i protoni con un'energia sufficiente a «fonderli» nei quark che li compongono. Uno degli obiettivi dei fisici che progettano la prossima generazione di grandi acceleratori – compreso uno in costruzione al Brookhaven National Laboratory, a Long Island – è in effetti quello di conseguire questa «fusione» della materia.

Ancora una volta, però, sono colpito dall'appropriatezza della scelta terminologica degli autori di *Star Trek.* La fusione dei protoni e la loro separazione in quark è quella che noi chiamiamo in fisica una transizione di fase. Ed ecco che, se si scorre il *Next Generation Technical Manual* per cercare il nome dei dispositivi del teletrasporto che smaterializzano la materia, si trova che sono chiamati «bobine di transizione di fase». I futuri progettisti di teletrasporti avranno dunque una scelta. Essi dovranno o trovare una fonte di energia in grado di produrre temporaneamente un'energia circa 10.000 volte maggiore dell'energia totale consumata oggi sulla Terra, nel qual caso potrebbero formare un «flusso di materia» atomica capace di muoversi assieme all'informazione a una velocità prossima a quella della luce, oppure potrebbero ridurre di un fattore 10 le richieste totali di energia e scoprire un modo per riscaldare istantaneamente un essere umano a una temperatura un milione di volte circa superiore a quella vigente nella regione centrale del Sole.

Se questa è la superstrada dell'informazione, avremmo fatto meglio a prendere la corsia veloce

Mentre scrivo queste pagine col mio *home computer,* mi meraviglio della rapidità con cui si è sviluppata questa tecnologia da quando ho comprato il mio primo Macintosh, un po' più di vent'anni fa. Ricordo che il computer aveva una memoria interna di 18 kilobyte, di contro ai 512 megabyte del mio computer attuale e ai 2048 megabyte nella *workstation* veloce che ho nel mio ufficio nel Dipartimento di fisica della Case Western Reserve University. In due decenni la capacità di memoria interna del mio computer è quindi cresciuta di un fattore di 10.000! A questo aumento si è accompagnato un aumento nella capacità dell'hard disk. Il mio primo computer non aveva addirittura un disco rigido e quindi doveva lavorare con floppy

disk, che potevano contenere 400 kilobyte d'informazione. Il mio home computer attuale ha un hard disk da 500 gigabyte, di nuovo con un aumento di più di un milione di volte rispetto al floppy disk iniziale di 400 kilobyte.

Anche la velocità del mio *home computer* è molto cresciuta negli ultimi vent'anni. Nell'esecuzione di calcoli numerici dettagliati, ritengo che il mio computer attuale sia quasi mille volte più veloce del mio primo Macintosh. La mia *workstation* in ufficio è forse altre dieci volte più veloce, eseguendo beh più di un miliardo di istruzioni al secondo!

Perfino nel settore di punta i miglioramenti sono stati impressionanti. I più veloci fra i computer di uso generale hanno aumentato nell'ultimo decennio la loro velocità e memoria di un fattore di circa 100. E non comprendo qui i computer costruiti per usi specializzati: questi piccoli miracoli della tecnologia possono avere velocità di calcolo effettive superiori a decine di miliardi di istruzioni al secondo. Qualcuno ha sostenuto che si potrebbe migliorare di vari ordini di grandezza la rapidità di certi computer specializzati usando nella loro costruzione sistemi biologici fondati sul DNA. In verità oggi sono in corso ricerche su un tipo di computer chiamato computer quantistico, su cui tornerò più avanti. Esso sfrutterà le bizzarre proprietà della meccanica quantistica per compiere simultaneamente fantastiliardi di calcoli. Non è affatto chiaro se una tale macchina sarà mai realizzata, ma il fatto che essa sia possibile, anche se solo in linea di principio, ha suscitato entusiasmo in legioni di fisici.

Ci si potrebbe chiedere dove condurrà tutto questo, e se sia possibile prevedere che in futuro ci sarà una crescita altrettanto rapida che in passato. Un'altra domanda valida è se riusciremo a tenere questo ritmo. Io so già che la strozzatura nella crescita della velocità nella superstrada dell'informazione è l'utente terminale. Noi possiamo assimilare solo una certa quantità di informazione. Se volete un esempio evidente di questo fatto provate a navigare per qualche ora su Internet. Io mi domando spesso perché, con l'incredibile potenza a mia disposizione, la mia produttività non abbia avuto un aumento paragonabile al miglioramento del mio computer. Penso che la risposta sia chiara. Io non sono limitato dalle capacità del mio computer, ma dalle mie proprie capacità. È stato sostenuto che, proprio per questa ragione, i computer potrebbero essere la prossima fase dell'evoluzione umana. È certamente vero che Data, anche se non ha emozioni, è molto superiore sotto vari aspetti ai membri umani dell'equipaggio dell'*Enterprise.* E, come si stabilisce in *La misura di un uomo,* è una forma di vita genuina.

Ma sto divagando. Il motivo per cui mi sono soffermato sulla crescita della capacità dei computer nell'ultimo decennio è per fare un confronto con ciò di cui avremmo bisogno per usare le possibilità di memorizzazione e ricupero dell'informazione associata al teletrasporto. E, ovviamente, siamo ancora ben lontani da tale obiettivo.

Facciamo una semplice stima di quanta informazione sia codificata in un corpo umano. Cominciamo dalla stima classica di 10^{28} atomi. Per ogni atomo dobbiamo codificare innanzitutto la posizione, la quale richiede tre coordinate *(x, y* e *z*). Poi dovremmo registrare lo stato interno di ogni atomo, comprendente informazioni come: quali livelli di energia siano occupati dai suoi elettroni, se esso sia o no legato a un atomo vicino per comporre una molecola, se la molecola vibri o ruoti e via dicendo. Cercando di essere prudenti, supponiamo di poter codificare tutte le informazioni relative a un atomo in un kilobyte di dati. (Un byte corrisponde a 8 bit, equivalenti, nella scrittura, a una lettera, un numero o un segno d'interpunzione. Supponiamo che una cartella standard corrisponda a circa 1 kilobyte.) Ciò significa che avremmo bisogno di circa 10^{28} KB per memorizzare uno schema umano nel buffer degli schemi. Vi ricordo che 10^{28} è un uno seguito da 28 zeri (ossia 10 miliardi di miliardi di miliardi).

Dopo avere compiuto questa stima nella prima edizione di questo libro, ricevetti una quantità di lettere da lettori che mi suggerivano modi per ridurre quel numero. Mi dicevano, per esempio, che tutti hanno un cuore, due polmoni ecc., cosicché non abbiamo bisogno di registrare tutti questi dati; oppure mi dicevano che ogni individuo è determinato dal suo DNA, cosicché sarebbe sufficiente registrare l'informazione contenuta nel DNA. Ma ovviamente ognuno di questi suggerimenti può essere contestato. Per esempio, è chiaro che la nostra condizione fisica non è determinata solo dal nostro DNA. Essa dipende anche dall'esercizio che facciamo, da quanto mangiamo, se fumiamo o no, e via dicendo. Ma anche ignorando tutti questi problemi, è chiaro che quel che conta veramente è il nostro cervello. È il cervello a fare di noi quel che siamo veramente, e per riprodurlo esattamente a livello molecolare, dove sono probabilmente registrate la nostra memoria e la nostra personalità, dovremmo memorizzare, entro un qualche ordine di grandezza in più o in meno, la quantità di dati che ho stimato sopra.

Confrontiamo questa informazione, per esempio, con quella contenuta in tutti i libri che siano mai stati scritti. Le maggiori biblioteche contengono vari milioni di volumi, cosicché vorrei essere generoso e dire che esistono un miliardo di libri diversi (un libro ogni sei persone attualmente viventi sul nostro pianeta). Diciamo che ogni libro contiene in media l'equivalente di un megabyte (MB) (anche questa è una stima generosa). Tutta l'informazione contenuta in tutti i libri che siano mai stati scritti richiederebbe quindi per essere memorizzata circa 10^{12} kilobyte, ossia circa un bilione, ovvero mille miliardi, di kilobyte (ossia un *petabyte*, corrispondente a 1000 *terabyte*; un *terabyte* è 10^9 kilobyte, N.d.T.). Questa cifra è

più piccola di circa sedici ordini di grandezza – ossia di diecimila bilioni di volte – della capacità di memoria necessaria per registrare una singola configurazione umana! Quando i numeri sono così grandi, diventa difficile capire l'immensità del compito. Forse vale la pena di cercare di spiegarlo facendo un paragone. Il rapporto fra l'informazione contenuta in una configurazione umana e quella contenuta in tutti i libri che siano mai stati scritti è diecimila volte maggiore del rapporto fra l'informazione contenuta in tutti i libri che siano mai stati scritti e l'informazione contenuta in questa pagina.

La memorizzazione di una quantità d'informazione così grande è, per usare una minimizzazione cara ai fisici, un compito non banale. Gli hard disk più grandi attualmente disponibili in commercio possono contenere circa 1000 gigabyte (GB), ossia un milione di megabyte (MB), di informazione (in breve, un terabyte). Se ogni disco ha uno spessore di circa 10 cm, disponendo uno sull'altro tutti i dischi attualmente necessari per memorizzare una configurazione umana, costruiremmo una pila alta un trecentesimo della distanza che ci separa dal centro della Galassia: circa 10.000 anni-luce, ossia un viaggio di cinque anni con l'*Enterprise* a curvatura 9!

Difficoltà non meno grandi presenta il richiamo di quest'informazione in tempo reale. I meccanismi più veloci per il trasferimento di informazione digitale sono in grado di trasferire attualmente poco meno di circa 10 GB al secondo. A questo ritmo, per scrivere su nastro i dati che descrivono uno schema umano occorrerebbe un tempo circa 20 volte maggiore dell'età attuale dell'universo (supponendo un'età approssimativa di 10 miliardi di anni)! Immaginate la tensione drammatica: Kirk e McCoy sono fuggiti dalla superficie della colonia penale di Rura Penthe. Per salire col teletrasporto sull'astronave non dispongono certamente di un periodo di tempo paragonabile all'età dell'universo; al trasferimento di quel milione di miliardi di miliardi di megabyte di informazione sono concessi solo pochi secondi, il tempo impiegato dal carceriere per puntare la sua arma prima di sparare.

Penso che il punto sia chiaro. Questo compito fa sbiadire il Progetto Genoma Umano attualmente in corso, che si propone di analizzare e registrare il codice genetico umano completo contenuto in microscopici filamenti di DNA: un'impresa del costo di molti milioni di dollari, in corso da almeno un decennio, la quale richiede risorse specifiche messe a disposizione in numerosi laboratori in tutto il mondo. Il lettore potrebbe quindi immaginare che io stia menzionando questo progetto solo per aggiungere altri elementi a quelli che fanno considerare poco plausibile il teletrasporto. Ma benché questa sfida sia difficilissima, io penso che in quest'area si potrebbe effettivamente pervenire a risultati concreti nel XXIII secolo. Il mio ottimismo deriva semplicemente dall'estrapolazione dell'attuale ritmo di crescita della tecnologia dei computer. Usando il precedente metro di misura del miglioramento di un fattore 100 per ogni decennio nella memorizzazione e nella rapidità, e dividendolo per 10 per motivi prudenziali – e tenendo conto che noi oggi siamo di circa 19 potenze del 10 lontani dall'obiettivo – possiamo attenderci di poter finalmente disporre della tecnologia informatica necessaria per affrontare con successo il compito del trasferimento di informazione per il teletrasporto fra 190 anni, appunto all'alba del XXIII secolo.

Lo dico, ovviamente, senza avere alcuna idea di come si riuscirà a risolvere il problema. È chiaro che, per poter registrare più di 10^{25} KB di informazione in un qualsiasi dispositivo in scala umana, si dovrà sfruttare ogni atomo del dispositivo come sito di memoria. La nozione emergente dei computer biologici, in cui la dinamica molecolare imita i processi logici digitali e in cui le 10^{25} particelle circa di un campione macroscopico operano tutte simultaneamente, mi sembra la più promettente sotto questo aspetto.

Dovrei inoltre ammonire a non prendere troppo sul serio le mie previsioni. Io non sono un informatico e il mio cauto ottimismo potrebbe perciò riflettere semplicemente la mia ignoranza. Traggo però qualche conforto dall'esempio del cervello umano, che è avanti di anni-luce per complessità e generalità rispetto a tutti i sistemi di calcolo esistenti. Se la selezione naturale è stata in grado di sviluppare un così bel dispositivo di memorizzazione e richiamo di informazione, credo che anche noi possiamo ancora fare molta strada.

C'è anche la meccanica quantistica

Per completare (e complicare) il quadro, si deve tener conto anche della meccanica quantistica. Al livello microscopico a cui si deve operare per analizzare e ricreare la materia nel teletrasporto, vigono le leggi strane ed esotiche della meccanica quantistica, in virtù delle quali le particelle possono comportarsi come onde e le onde possono comportarsi come particelle. Io non mi propongo certamente di tenere qui un corso di meccanica quantistica. Si deve però tenere presente che a scale microscopiche non si possono separare osservato e osservatore. Eseguire una misurazione significa alterare un sistema, di solito per sempre. Questa semplice legge può essere parametrizzata in molti modi diversi, ma la sua formulazione più famosa è forse quella nella forma del principio di indeterminazione di Heisenberg. Questa importante legge – che sembra abolire la classica nozione del determinismo in fisica, anche se in realtà a un livello fondamentale non è così – divide il mondo fisico in due insiemi di quantità osservabili: lo yin e lo yang, se così vi pare. Essa ci dice che, *qualunque tecnologia*

possa essere inventata in futuro, è impossibile misurare certe combinazioni di osservabili con una precisione alta a piacere. A scale microscopiche si potrebbe misurare con una precisione a piacere la posizione di una particella; Heisenberg ci dice però che, in questo caso, non possiamo conoscere esattamente la sua velocità (e quindi non possiamo sapere dove si troverà nell'istante successivo). Oppure potremmo accertare lo stato di energia di un atomo con una precisione a piacere, ma in questo caso non possiamo determinare esattamente quanto a lungo rimarrà in tale stato. E l'elenco potrebbe continuare.

Queste relazioni sono al centro della meccanica quantistica e non perderanno mai la loro validità. Finché lavoreremo a scale in cui si applicano le leggi della meccanica quantistica – le quali, a quanto indicano le nostre conoscenze, sono quanto meno più grandi della scala a cui diventano importanti effetti gravitazionali, ossia a circa 10^{-33} cm – siamo costretti a tenerne conto.

C'è un ragionamento fisico lievemente imperfetto, ma tuttavia molto soddisfacente, che ci consente una comprensione euristica del principio di indeterminazione. La meccanica quantistica attribuisce a tutte le particelle un comportamento ondulatorio, e le onde hanno una proprietà sorprendente: sono disturbate solo quando incontrano oggetti più grandi della loro lunghezza d'onda (la distanza fra due creste successive). Per rendersene conto nel modo più chiaro è sufficiente osservare le onde del mare. Un ciottolo che sporga appena dalla superficie dell'acqua non avrà alcun effetto sulle forma delle onde che avanzano verso la spiaggia, mentre un grosso scoglio avrà dietro di sé una regione di acqua calma.

Così, se vogliamo «illuminare» un atomo – cioè far rimbalzare della luce su di esso per vedere dove si trova – dobbiamo farlo con luce di una lunghezza d'onda abbastanza piccola da poter essere disturbata dall'atomo. Le leggi della meccanica quantistica ci dicono però che le onde luminose viaggiano in piccoli pacchetti, o quanti, che chiamiamo fotoni (come i «siluri fotonici» nelle navi spaziali). I singoli fotoni di ogni lunghezza d'onda hanno un'energia che è inversamente proporzionale alla loro lunghezza d'onda. Quanto maggiore è la risoluzione che desideriamo, tanto minore è la lunghezza d'onda della luce che dobbiamo usare. Ma quanto minore è la lunghezza d'onda, tanto maggiore è l'energia dei pacchetti. Se, per poter osservare un atomo, lo bombardiamo con un fotone ad alta energia, possiamo stabilire esattamente dove si trovava quando il fotone lo ha colpito, ma il processo d'osservazione stesso – ossia il fatto di colpire l'atomo col fotone – trasferisce all'atomo un'energia abbastanza grande da modificare in qualche misura la velocità e direzione del suo moto.

È perciò impossibile risolvere gli atomi e le loro configurazioni di energia con la precisione necessaria per ricreare esattamente uno schema umano. Un'incertezza residua in alcune delle osservabili è inevitabile. Che cosa questo fatto possa significare per la precisione del prodotto finale dopo il trasporto è un delicato problema biologico su cui posso solo fare delle congetture.

Questo problema non sfuggì agli autori di *Star Trek,* i quali si resero conto degli inevitabili vincoli della meccanica quantistica sul tele trasporto. In virtù di una cosa a cui i fisici non possono di solito appellarsi – ossia la licenza artistica –, essi introdussero i «compensatori di Heisenberg», che permettono la «risoluzione quantica» di oggetti. Quando un intervistatore domandò al consulente tecnico di *Star Trek* Michael Okuda come funzionassero i compensatori di Heisenberg, egli rispose semplicemente: «Benissimo, grazie!»

I compensatori di Heisenberg assolvono un'altra funzione utile nelle storie di *Star Trek.* Ci si può domandare, come ho fatto io stesso, perché il teletrasporto non sia anche un replicatore di forme di vita. Dopo tutto, a bordo delle navi spaziali c'è un replicatore che fa apparire magicamente, a un semplice comando a voce, bicchieri d'acqua o di vino (anche champagne) negli alloggi di ogni membro dell'equipaggio. La risposta sembra essere che la tecnologia dei replicatori può operare solo a una «risoluzione a livello molecolare» e non a una «risoluzione quantica». Ciò dovrebbe spiegare perché non sia possibile la replica di esseri viventi, e anche perché i membri dell'equipaggio si lagnino sempre che i cibi forniti dai replicatori non sono mai così buoni come i cibi veri, e perché Riker, fra gli altri, preferisca cucinarsi omelette e altre ghiottonerie nel modo tradizionale.

Poco dopo l'uscita della prima edizione del libro, ricevetti una telefonata da una stazione radio austriaca. Erano press'a poco le 5 del mattino, e la persona che mi chiamava mi chiese un commento sul nuovo fenomeno del «teletrasporto quantistico». Pareva che a Vienna qualcuno avesse appena compiuto un esperimento che convalidava un fenomeno su cui avevano riferito tempo prima alcuni scienziati dell'IBM. Risultò che l'IBM aveva pubblicato nel Rolling Stone Magazine, oltre che su altri organi di stampa, un'inserzione a piena pagina, in cui una donna, chiacchierando al telefono con un'altra, le diceva qualcosa di simile a questo: «Non riesci a seguire la ricetta? Non preoccuparti. Ti teletrasporterò lì il goulasch». Si supponeva che con queste parole I'IBM annunciasse una sorprendente nuova tecnica su cui i suoi dipendenti stavano lavorando e che avrebbe di lì a poco rivoluzionato le comunicazioni.

Penso che, in assenza del teletrasporto di *Star Trek,* l'annuncio dell'IBM sarebbe rimasto probabilmente nascosto nell'ultima pagina dei quotidiani; invece, in quella situazione, fui assediato da richieste di interviste. Si sarebbe presto

avverata la possibilità di essere tele trasportati come i membri dell'equipaggio di *Star Trek*?

L'esperimento di Vienna, che è stato poi affinato e ampliato nel corso degli ultimi dieci anni, comportava la distruzione della configurazione quantica di un singolo fotone – un quanto di luce – in un determinato luogo, e la creazione istantanea di una configurazione identica in un altro luogo a una certa distanza dal primo. Nulla potrebbe assomigliare di più al teletrasporto di *Star Trek*! Dopo quell'esperimento ne sono stati eseguiti altri simili con singoli atomi o con molecole contenenti vari atomi. Il teletrasporto istantaneo ebbe luogo inoltre su distanze di vari chilometri!

Per quanto tutto ciò possa sembrare miracoloso, per questo teletrasporto quantistico vengono sfruttate proprio le leggi della meccanica quantistica, le stesse leggi che rendono impossibile un teletrasporto standard del tipo da me descritto. La meccanica quantistica ci dice che, se predisponiamo con molta cura le configurazioni quantiche iniziali, due particelle possono essere «*entangled*»[12] insieme in un singolo stato quantomeccanico. Se poi le due particelle vengono portate a grandi distanze fra loro, purché nulla abbia interagito nel frattempo con esse, compiendo un esperimento su una particella – per esempio osservando se si trova in una configurazione specifica –, ne sarà istantaneamente determinata la configurazione dell'altra. Questa conclusione rimane vera anche se ora la seconda particella si trova ad anni-luce di distanza! Benché questo fatto sembri violare la regola di Einstein che l'informazione non possa propagarsi a una velocità maggiore di quella della luce, risulta che si può dimostrare che l'*entanglement* quantomeccanico non può essere usato per inviare istantaneamente messaggi, cosicché rimane salva la distinzione di causa ed effetto.

In ogni caso l'*entanglement* quantistico svolge un ruolo cruciale nel teletrasporto quantistico. Associando strettamente (*entangling*) la configurazione di una particella con un'altra particella, la quale interagisce poi con una terza particella che si trova a qualche distanza dalla prima, ed eseguendo poi una specifica misurazione sulla prima particella (misurazione che ne cambia ovviamente lo stato), si può far sì che la configurazione della terza particella, che ora è *entangled* con la seconda, si trasformi istantaneamente in uno stato identico alla configurazione iniziale della prima particella prima della misurazione.

Se tutto questo vi sembra un po' confuso non angustiatevi perché, per quanto questo fenomeno sia notevole, vorrei dimostrare che esso non sarebbe di alcuna utilità nel teletrasporto di un essere umano, e ancora meno di un goulasch ungherese. Il funzionamento del teletrasporto quantistico richiede stati quantici iniziali preparati con grande precisione e poi un sistema che rimanga isolato dall'ambiente nel corso dell'intero processo. Nulla potrebbe essere però più lontano dalla situazione in cui esistiamo. Noi non siamo oggetti quantistici. Se lo fossimo, le leggi della meccanica quantistica non ci sembrerebbero così strane. Oggetti macroscopici come gli esseri umani sono configurazioni complesse di molte particelle, le quali interagiscono così frequentemente fra loro e col loro ambiente che tutte le correlazioni e gli *entanglement* quantomeccanici ne vengono rapidamente distrutti.

Ma anche nell'ipotesi che il teletrasporto quantistico non possa mai fornire un meccanismo funzionante per trasferire esseri umani da un luogo all'altro, esso ha usi potenziali, fra cui quello di poter trasmettere in modo sicuro informazioni da un luogo a un altro, senza timore che quelle informazioni possano essere intercettate e decifrate da terzi. Esso potrebbe svolgere un ruolo anche nella realizzazione di un computer quantistico efficiente. Durante i passi intermedi dei molti calcoli simultanei che potrebbero essere eseguiti da un computer quantistico (è questa la ragione per cui un computer quantistico potrebbe permettere di eseguire calcoli che richiederebbero a un computer normale un tempo più lungo dell'età dell'universo), l'informazione dev'essere trasferita da un luogo all'altro nel computer senza distruggere le configurazioni quantistiche implicate nel calcolo, come avverrebbe se si dovessero eseguire misurazioni classiche. Se però le configurazioni fossero «teletrasportate», durante il calcolo quantistico si conserverebbero gli stati quantici.

Ci credo se lo vedo

Consideriamo un'ultima difficoltà per il teletrasporto, come se quelle che abbiamo visto finora non fossero ancora sufficienti. Il trasporto dalla nave spaziale a un pianeta è difficile, ma ancora più difficile è l'operazione inversa. Per far risalire un membro dell'equipaggio sulla nave, i sensori a bordo dell'*Enterprise* devono individuare il membro dell'equipaggio sul pianeta sottostante. Inoltre, devono analizzare l'individuo prima della smaterializzazione e del trasporto del flusso di materia. L'*Enterprise* deve quindi avere un telescopio abbastanza potente da analizzare oggetti a una risoluzione atomica sulla superficie di un pianeta, e spesso anche sotto la superficie. Il normale raggio d'operazione dell'apparecchiatura è, a quanto ci viene detto, di circa 40.000 km, ossia di più di tre volte il diametro terrestre. Questo è il numero che useremo per la stima seguente.

Tutti hanno visto fotografie delle cupole dei massimi telescopi del mondo, come il telescopio Keck nelle Hawaii (il più grande del mondo), o il telescopio di Monte Palomar in California. Vi siete mai domandati perché si costruiscano telescopi sempre più grandi? (Non è solo una mania di grandezza, come amano sostenere alcune persone, fra cui molti membri del

Congresso.) Come si richiedono acceleratori di dimensioni sempre maggiori per scandagliare la struttura della materia a scale sempre più piccole, così sono necessari telescopi di volta in volta maggiori se si vogliono risolvere oggetti celesti via via più deboli e più lontani. Il ragionamento è semplice: la luce, a causa della sua natura ondulatoria, tende a diffrangersi o a diffondersi ogni volta che passa attraverso un'apertura. La luce proveniente da una sorgente puntiforme lontana, passando per l'obiettivo del telescopio, produce un'immagine un po' diffusa, cosicché, invece di vedere un punto di luce si vedrà un piccolo disco indistinto. Ora, se due sorgenti puntiformi nel campo visivo sono a una distanza fra loro inferiore al diametro apparente dei loro dischi, sarà impossibile risolverle come oggetti separati in quanto si avrà una sovrapposizione dei loro dischi nell'immagine osservata. Ora, quanto maggiore sarà il diametro dell'obiettivo, tanto minore sarà il disco apparente di una sorgente puntiforme. Perciò, per risolvere oggetti sempre più piccoli, i telescopi dovranno avere un'apertura sempre maggiore.

C'è un altro modo per risolvere piccoli oggetti con un telescopio. La lunghezza d'onda della luce, o di qualsiasi radiazione si voglia usare come sonda, dev'essere minore dell'oggetto che si cerca di analizzare, secondo il ragionamento esposto prima. Così, se si vuol risolvere la materia alla scala atomica, che si aggira attorno a qualche miliardesimo di centimetro, si deve usare una radiazione di una lunghezza d'onda di meno di un miliardesimo di centimetro circa. Se si sceglie una radiazione elettromagnetica, si richiederà l'uso o di raggi X o di raggi gamma. Qui si pone immediatamente un problema, poiché tali radiazioni sono dannose alla vita, e quindi l'atmosfera di ogni pianeta della Classe M le filtrerà, così come fa la nostra atmosfera. Il dispositivo per il teletrasporto dovrà perciò usare sonde non elettromagnetiche, come neutrini o gravitoni. Questi presentano a loro volta i loro problemi, ma non è il caso di tediare oltre il lettore.

In ogni modo, dato che l'*Enterprise* usa una radiazione con una lunghezza d'onda di meno di un miliardesimo di millimetro e analizza un oggetto a 40.000 km di distanza con una risoluzione alla scala atomica, si può fare un calcolo. Secondo i miei calcoli, la nave spaziale avrebbe bisogno a questo scopo di un telescopio con un'apertura di oltre 50.000 km di diametro! Un telescopio più piccolo non potrebbe fornire una risoluzione alla scala del singolo atomo neppure in linea teorica. Io penso che sia giusto dire che l'*EnterpriseD,* pur essendo una grande madre, non è poi così grande.

Come ho promesso, la riflessione sul teletrasporto ci ha condotti alla meccanica quantistica, alla fisica delle particelle, all'informatica, alla relazione massa-energia di Einstein e persino al problema dell'esistenza dell'anima umana. Non dovremmo perciò lasciarci troppo scoraggiare dalla chiara impossibilità di costruire un dispositivo per il teletrasporto in grado di assolvere le funzioni necessarie. O, per esprimerci in modo meno negativo, la costruzione di un tale dispositivo ci richiederebbe di riscaldare della materia sino a una temperatura un milione di volte superiore a quella vigente al centro del Sole, di spendere in una singola macchina più energia di quella usata attualmente da tutta l'umanità, di costruire telescopi di apertura maggiore del diametro della Terra, di migliorare gli attuali computer di un fattore di mille miliardi di miliardi (10^{21}) e di evitare le leggi della meccanica quantistica. Non sorprende che il tenente Barclay fosse terrorizzato dal teletrasporto! Io penso che persino Gene Roddenberry, se dovesse affrontare questo rischio nella sua vita reale, preferirebbe probabilmente investire fondi in un'astronave capace di atterrare.

6. Un dollaro di antimateria

"L'irreale non esiste."
Prima legge della metafisica di Kir-kin-tha
(Star Trek TV: Rotta verso la Terra)

UNA cinquantina di km a ovest di Chicago, sulla Interstate 88, nei pressi di Aurora, il tumultuoso paesaggio urbano trapassa nella dolce prateria del Midwest, che si estende fin dove può spaziare lo sguardo. Leggermente a nord dell'Internate, si trova un anello di terra contrassegnato da quello che sembra un fossato circolare. All'interno della proprietà si possono vedere bisonti al pascolo e molte specie di anatre e oche in una successione di stagni.

Sei soli metri sotto la superficie siamo molto lontani da quella calma atmosfera bucolica. Un intenso fascio di antiprotoni colpisce frontalmente, 400.000 volte al secondo, un fascio di protoni, producendo una pioggia di centinaia di migliaia di particelle secondarie: elettroni, positroni, pioni e altre.

È il Fermi National Accelerator Laboratory, in breve Fermilab. Esso contiene l'acceleratore di particelle più potente del mondo, che sarà ben presto soppiantato dal Large Hadron Collider (LHC), Grande Collisore di Adroni, entrato in funzione a Ginevra nel 1908. (In conseguenza di danni sopravvenuti ad alcuni magneti superconduttori, l'LHC non rientrerà in funzione prima del settembre del 2009.) Più interessante ai nostri fini è il fatto che il Fermilab è il massimo serbatoio mondiale di antiprotoni. Qui l'antimateria non è una cosa da fantascienza, ma il pane quotidiano delle migliaia di ricercatori che usano gli impianti del laboratorio.

In questo senso il Fermilab e l'*U.S.S. Enterprise* hanno una certa affinità. L'antimateria è cruciale per il funzionamento di una nave spaziale: essa alimenta il motore di curvatura. Come abbiamo visto in precedenza, non esiste un modo più efficiente per alimentare un sistema di propulsione (anche se il motore di curvatura non si fonda sulla propulsione a razzo). Antimateria e materia, quando entrano in contatto, possono annichilarsi completamente e produrre radiazione pura, la quale si propaga alla velocità della luce.

Ovviamente si deve avere un'assoluta certezza che l'antimateria sia ben isolata ogni volta che la si carica nella stiva. Quando, a bordo di una nave spaziale, i sistemi di contenimento dell'antimateria entrano in avaria, come avvenne per l'*Enterprise* in conseguenza della sua collisione con la *Bozeman,* o per la *Yamato* in conseguenza dell'arma informatica iconiana, ne segue subito dopo inevitabilmente la distruzione totale. Il contenimento dell'antimateria è in effetti così fondamentale per il funzionamento delle navi spaziali che è difficile capire come mai, nell'episodio *Disastro sull'Enterprise,* il tenente comandante della Federazione Deanna Troi ignorasse le conseguenze della perdita del contenimento quando assunse temporaneamente il comando all'*Enterprise* dopo la collisione della nave con due «filamenti quantici». Il fatto che avesse avuto un addestramento formale solo come psicologa non avrebbe dovuto essere sufficiente a giustificarla!

Il sistema di contenimento dell'antimateria a bordo delle astronavi è plausibile, usando di fatto lo stesso principio che permette al Fermilab di immagazzinare antiprotoni per lunghi periodi. Antiprotoni e antielettroni (chiamati positroni) sono particelle dotate di carica elettrica. In presenza di un campo magnetico le particelle cariche si muovono in orbite circolari. Così, se acceleriamo le antiparticelle in campi elettrici, e poi applichiamo loro un campo magnetico di intensità appropriata, esse si muoveranno in cerchi di grandezza prescritta. Potranno così muoversi, per esempio, all'interno di un contenitore in forma di ciambella senza mai toccarne le pareti. Questo principio è usato anche nei cosiddetti Tokamak, macchine di forma toroidale destinate a contenere i plasmi ad alta temperatura negli esperimenti di fusione nucleare controllata.

La sorgente di antiprotoni per il collisore del Fermilab contiene un grande anello di magneti. Una volta prodotti, in collisioni di media energia, gli antiprotoni vengono guidati in questo anello, dove possono essere accumulati fino a quando non saranno richiesti per collisioni ad altissima energia, che hanno luogo nel Tevatron, il collisore ad alta energia del Fermilab. Il Tevatron è un anello molto più grande, della circonferenza di circa sei chilometri. Nell'anello vengono iniettati protoni, che sono accelerati in una direzione, menile gli antiprotoni sono accelerati nella direzione opposta. Se il campo magnetico viene regolato con precisione, questi due fasci di particelle possono essere tenuti separati per la maggior parte della lunghezza del tunnel. In punti specificati, però, i due fasci convergono, e i fisici studiano le collisioni.

Oltre al contenimento, se vogliamo usare un motore a materia e antimateria si pone immediatamente un altro problema: dove prendere l'antimateria. A quanto possiamo dire, l'universo è composto per lo più da materia, non da antimateria. Noi possiamo confermarlo esaminando il contenuto dei raggi cosmici ad alta energia, molti dei quali hanno origine in legioni assai lontane dalla nostra Galassia. Qualche antiparticella dovrebbe essere generata durante le collisioni dei raggi cosmici ad alta energia con la materia, e se si esamina la natura dei raggi cosmici su grandi ambiti di energia il segnale dell'antimateria è

in perfetto accordo con l'ipotesi che essa venga prodotta solo attraverso questo fenomeno; non c'è alcuna prova di una componente primordiale dell'universo di antimateria.

Un altro segno possibile della presenza di antimateria nell'universo sarebbe il fenomeno dell'annichilazione nelle collisioni di particelle e antiparticelle. Dovunque i due tipi di particelle coesistono, ci si può attendere di vedere la radiazione caratteristica che viene emessa nel processo di annichilazione. Questo è di fatto esattamente il modo in cui l'*Enterprise* cercò l'Entità di cristallo dopo che questa ebbe distrutto una nuova base avanzata della Federazione. A quanto pare l'Entità lasciò dietro di sé una traccia di antiprotoni. Cercando la radiazione di annichilazione, l'*Enterprise* riuscì a trovare l'Entità e a sconfiggerla prima che potesse attaccare un altro pianeta.

Pur concependo correttamente l'idea dell'antimateria, gli autori di *Star Trek* non ne capirono correttamente i particolari. Il dottor Marr e Data cercarono un picco netto di «radiazione gamma» a «10 keV» (il kilo-elettronvolt è un'unità di energia di radiazione). Questa è però una scala di energia sbagliata per l'annichilazione di protoni e antiprotoni, e in realtà non corrisponde a nessun segnale di annichilazione noto. La particella più leggera che si conosca fra quelle dotate di massa è l'elettrone. Se elettroni e positroni si annichilano, producono un picco netto di radiazione gamma a 511 keV, corrispondenti alla massa dell'elettrone. Protoni e antiprotoni produrrebbero un picco netto a un'energia corrispondente all'energia di quiete del protone, ossia attorno a 1 GeV (giga-elettronvolt): un'energia centomila volta maggiore di quella cercata da Marr e da Data. (Per inciso, 10 keV è nella banda di radiazione dei raggi X, non nella banda dei raggi gamma, che in generale corrisponde a un'energia superiore a 100 keV, ma questo è probabilmente un particolare troppo sottile perché sia lecito lagnarsene.)

In ogni caso, astronomi e fisici hanno cercato segnali di fondo diffusi attorno a 511 keV e nella gamma dei GeV come segnali di grandi conflagrazioni di materia e antimateria, ma non hanno trovato niente. Questo risultato e le ricerche sui raggi cosmici indicano che, anche se nell'universo dovessero esistere distribuzioni consistenti di antimateria, non dovrebbero essere frammischiate a materia ordinaria.

Poiché la maggior parte di noi si trova più a suo agio con la materia che con l'antimateria, può sembrare del tutto naturale che l'universo sia formato dalla prima e non dalla seconda. In questo fatto non c'è però niente di naturale. In effetti l'origine dell'eccesso della materia sull'antimateria è oggi uno dei più interessanti problemi non risolti della fisica, ed è attualmente oggetto di intense ricerche. Questo eccesso è molto importante per la nostra esistenza, e quindi anche per quella di *Star Trek;* pare quindi appropriato fare qui una pausa per concederci una riflessione su questo problema.

La meccanica quantistica fu applicata con successo fin dai suoi inizi a fenomeni fisici atomici; in particolare, permise di spiegare mirabilmente il comportamento degli elettroni negli atomi. Era chiaro però che un limite di questo nuovo campo di studio era che le velocità degli elettroni sono in generale molto minori della velocità della luce. Rimase quindi aperto per quasi due decenni il problema di come conciliare gli effetti della relatività ristretta con la meccanica quantistica. Questo ritardo fu dovuto in parte al fatto che, diversamente dalla relatività ristretta, che è molto semplice nella sua applicazione, la meccanica quantistica richiedeva non solo un'intera nuova visione del mondo ma anche un gran numero di nuove tecniche matematiche. Nei primi tre decenni di questo secolo i migliori giovani fisici si dedicarono totalmente al compito di esplorare tale notevole nuova immagine dell'universo.

Uno di tali giovani fisici fu Paul Adrien Maurice Dirac. Come il suo successore Stephen Hawking, e in seguito Data, egli sarebbe stato un giorno titolare della cattedra lucasiana di matematica all'Università di Cambridge, che era già stata di Newton. Allievo di Lord Rutherford, e successivamente allievo-collaboratore di Niels Bohr, Dirac era meglio preparato dei suoi colleghi a estendere la meccanica quantistica nel regno delle grandissime velocità. Nel 1928, come già Einstein prima di lui, scrisse un'equazione che avrebbe cambiato il mondo. L'equazione di Dirac descrive correttamente il comportamento relativistico degli elettroni in termini pienamente quantomeccanici.

Poco tempo dopo avere scritto questa equazione, Dirac si rese conto che, per conservare la consistenza matematica, si richiedeva l'esistenza in natura di un'altra particella di carica uguale ma opposta. Una particella del genere era ovviamente già nota: il protone. L'equazione di Dirac suggeriva però che tale particella doveva avere la stessa massa dell'elettrone, mentre il protone è quasi duemila volte più pesante. Questa discrepanza fra l'osservazione e l'interpretazione «ingenua» della matematica rimase un rompicapo per quattro anni, fino a quando il fisico americano Carl Anderson scoprì, fra i raggi cosmici che bombardano la Terra, una nuova particella di massa identica a quella dell'elettrone ma di carica opposta, cioè positiva. Questo «antielettrone» divenne noto ben presto col nome di positrone.

Come è diventato chiaro da allora, una delle conseguenze inevitabili della fusione della relatività ristretta con la meccanica quantistica è che tutte le particelle esistenti in natura devono possedere antiparticelle, la cui carica elettrica (quando è presente) e varie altre proprietà dovrebbero essere opposte alle loro. Se ogni particella ha la sua antiparticella, è del tutto arbitrario quale considerare come particella e quale come antiparticella, purché nessun processo fisico manifesti una

preferenza per le une o per le altre. Nel mondo classico dell'elettromagnetismo e della gravità non esiste un processo che privilegi una particella o la sua antiparticella.

A questo punto veniamo a trovarci in una difficoltà. Se particelle e antiparticelle sono su un piede di assoluta uguaglianza, perché mai le condizioni iniziali dell'universo hanno determinato che quelle che noi chiamiamo particelle comprendessero la parte dominante della materia? Senza dubbio una condizione iniziale più ragionevole, o almeno più simmetrica, sarebbe che all'inizio il numero di particelle e antiparticelle fosse identico. In questo caso dovremmo spiegare come le leggi della fisica, che a quanto pare non distinguono fra particelle e antiparticelle, possano essere riuscite in qualche modo a produrne più di un tipo che dell'altro. O nell'universo esiste una quantità fondamentale – il rapporto delle particelle alle antiparticelle – che era già fissato all'inizio del tempo e su cui le leggi della fisica non hanno a quanto pare niente da dire, oppure dobbiamo spiegare la successiva paradossale creazione dinamica di più materia che antimateria.

Negli anni '60 il famoso scienziato sovietico poi dissidente Andrej Sacharov fece una modesta proposta. Egli sostenne che se, nelle leggi della fisica, erano soddisfatte nei primissimi istanti dell'universo tre condizioni, era possibile che si producesse dinamicamente un'asimmetria fra materia e antimateria, anche se tale asimmetria non esisteva all'inizio. Al tempo in cui Sacharov fece questa proposta non c'erano teorie fisiche che soddisfacessero la condizione da lui posta. Da quel tempo, però, sia la fisica delle particelle sia la cosmologia hanno compiuto grandi passi avanti. Oggi abbiamo molte teorie che, in linea di principio, sono in grado di spiegare direttamente la differenza osservata nell'abbondanza fra materia e antimateria in natura. Purtroppo, per funzionare, richiedono tutte una nuova fisica e nuove particelle elementari; fino a quando la natura non ci indicherà la giusta direzione, non sapremo quali scegliere. Tuttavia molti fisici, fra cui io stesso, trovano un grande conforto nella speranza che un giorno si possa spiegare esattamente perché esista la materia stessa fondamentale per la nostra esistenza.

Ora, se avessimo la teoria corretta, quale numero essa dovrebbe spiegare? Quale doveva essere, ai primissimi inizi dell'universo, l'eccesso dei protoni sugli antiprotoni necessario per spiegare l'eccesso osservato della materia sull'antimateria nell'universo di oggi? Possiamo avere un indizio di questo numero confrontando l'abbondanza dei protoni di oggi con l'abbondanza dei fotoni, le particelle elementari che formano la luce. Se l'universo avesse avuto inizio con un numero uguale di protoni e di antiprotoni, essi si sarebbero totalmente annichilati, producendo radiazione, ossia fotoni. Ogni annichilazione protone-antiprotone nell'universo iniziale avrebbe prodotto, in media, un paio di fotoni. Supponendo, però, che ci fosse un piccolo eccesso dei protoni sugli antiprotoni, non tutti i protoni si sarebbero annichilati. Contando il numero dei protoni rimasti al termine delle annichilazioni, e confrontandolo con il numero dei fotoni prodotti da tali annichilazioni (ossia con il numero dei fotoni della radiazione di fondo rimasta come residuo del big bang), possiamo farci un'idea di quale fosse l'eccesso frazionario della materia sull'antimateria nell'universo iniziale.

Troviamo che nell'universo attuale c'è press'a poco un protone ogni 10 miliardi di fotoni della radiazione cosmica di fondo. Ciò significa che l'eccesso originario dei protoni sugli antiprotoni era di solo *1 su 10 miliardi*! In altri termini, nell'universo iniziale c'erano dieci miliardi e un protone ogni 10 miliardi di antiprotoni! Anche un eccesso così piccolo (accompagnato da un eccesso simile dei neutroni e degli elettroni sulle loro antiparticelle) sarebbe stato sufficiente a produrre tutta la materia che si osserva oggi nell'universo stelle, galassie, pianeti – e tutto ciò che noi conosciamo e amiamo.

Pensiamo che sia questo il meccanismo attraverso il quale l'universo è venuto a essere formato di materia e non di antimateria. La morale di questa storia per *Star Trek,* a prescindere dal suo interesse intrinseco, è che se si vuol costruire un motore a materia-antimateria, non si può raccogliere l'antimateria nello spazio perché la sua abbondanza è davvero trascurabilissima. Probabilmente la si dovrà invece produrre.

Per trovare come, torniamo ai nostri bisonti che pascolano nella prateria del Midwest sopra l'acceleratore del Fermilab. Mentre riflettevo sugli aspetti logistici di questo problema, decisi di mettermi in contatto col direttore del Fermilab, John Peoples jr. – che dirigeva lo sforzo di progettare e costruire la sua sorgente di antiprotoni – e chiedergli se poteva aiutarmi a stabilire quanti antiprotoni si potrebbero produrre e immagazzinare per dollaro in dollari attuali. Egli accettò gentilmente di aiutarmi, disponendo che vari membri del suo personale mi fornissero le informazioni necessarie per poter compiere stime ragionevoli.

Il Fermilab produce antiprotoni in collisioni di media energia di protoni con un bersaglio di litio. Di quando in quando queste collisioni producono un antiprotone, che viene poi fatto entrare nell'anello di accumulazione sotto la prateria su cui pascolano i bisonti. Quando opera a un'efficienza media, il Fermilab può produrre in questo modo circa 50 miliardi di antiprotoni all'ora. Supponendo che la sorgente di antiprotoni operi nel corso di tutto l'anno per il 75 per cento circa del tempo, si ha un totale di circa 6000 ore di funzionamento all'anno, cosicché il Fermilab dovrebbe produrre in media circa 300.000 miliardi (3×10^{14}) di antiprotoni all'anno.

Il costo dei componenti dell'acceleratore del Fermilab che hanno un rapporto diretto con la produzione di antiprotoni è di circa 500 milioni di dollari, in dollari del 1995. L'ammortamento di questa somma su una vita utile ipotizzata di 25 anni dà

20 milioni di dollari all’anno. Il costo annuo del personale è di circa 8 milioni di dollari. All’elenco dei costi si deve aggiungere quello della grandissima quantità di energia elettrica necessaria per produrre i fasci di particelle e per accumulare gli antiprotoni. Ai prezzi correnti dell’Illinois, abbiamo un costo di 15 milioni di dollari all’anno. Si arriva così a un totale annuo di circa 48 milioni di dollari per produrre i 300 bilioni di antiprotoni che il Fermilab usa annualmente per esplorare la struttura fondamentale della materia nell’universo. Con la spesa di un dollaro si producono quindi circa 6 milioni di antiprotoni!

Ora, noi potremmo probabilmente avere i nostri antiprotoni a un prezzo minore. Il Fermilab produce infatti un fascio di antiprotoni ad alta energia, e se noi chiedessimo solo gli antiprotoni senza le alte energie potremmo ridurre i costi, forse di un fattore compreso fra 2 e 4. Perciò, per essere generosi, supponiamo che con la tecnologia di oggi si potrebbero avere per un dollaro da 10 a 20 milioni di antiprotoni.

La prossima domanda è quasi fin troppo ovvia. Quanta energia si potrà avere per un dollaro? Convertendo per intero in energia la massa di un dollaro di antiprotoni, libereremmo approssimativamente 1/1000 di un joule, che è la quantità di energia che si richiede per riscaldare un grammo d’acqua circa di circa 1/1000 di grado Celsius. Non è una notizia molto incoraggiante.

Forse un modo migliore per presentare le capacità potenziali della sorgente di antiprotoni del Fermilab come nucleo di un motore di curvatura è quello di considerare l’energia che si potrebbe generare utilizzando ogni antiprotone prodotto dalla sorgente in tempo reale. La sorgente di antiprotoni può produrre 50 miliardi di antiprotoni all’ora. Se tutti questi antiprotoni fossero convertiti in energia, ne risulterebbe una generazione di potenza di circa 1/1000 di watt! In altri termini, occorrerebbero circa 100.000 sorgenti di antiprotoni come quella del Fermilab per alimentare una singola lampadina a incandescenza! Dato il costo totale annuo di 48 milioni di dollari della sorgente di antiprotoni, per illuminare in questo modo il soggiorno della vostra casa non basterebbe una somma pari al bilancio annuale del governo degli Stati Uniti.

Il problema centrale è che, nella situazione attuale, per produrre un antiprotone si richiede un’energia molto maggiore di quella che si potrebbe ottenere riconvertendo in energia la sua massa di quiete. La perdita di energia durante il processo di produzione è probabilmente di almeno un milione di volte maggiore dell’energia contenuta nella massa dell’antiprotone. Prima di poter anche solo pensare di usare motori a materia-antimateria per volare verso le stelle, occorre trovare mezzi molto più efficienti per la produzione di antimateria.

È chiaro anche che, se l’*Enterprise* dovesse produrre la propria antimateria, si richiederebbero grandi nuove tecnologie di scala, non solo per la riduzione dei costi, ma anche per la riduzione dello spazio. Se si dovessero utilizzare le tecniche degli acceleratori, sarebbero necessarie macchine in grado di generare molta più energia per metro di quelle attuali. Potrei aggiungere che questo problema è agli inizi del XXI secolo oggetto di intense ricerche. Se si vuole evitare che la costruzione degli acceleratori di particelle, che sono gli unici strumenti di cui disponiamo attualmente per l’esplorazione diretta della struttura fondamentale della materia, diventi troppo costosa anche per consorzi internazionali, si devono sviluppare nuove tecnologie per accelerare le particelle elementari. (Il governo americano ha deciso recentemente che è troppo costoso costruire un acceleratore della prossima generazione negli Stati Uniti, cosicché un gruppo europeo ne ha costruito uno a Ginevra, destinato a tornare in funzione nell’autunno del 2009 dopo alcuni guasti ai magneti superconduttori.) L’estrapolazione di tendenze passate nell’efficienza della produzione di energia, misurata per metro di acceleratore, induce a pensare che ogni decennio o due sia possibile un miglioramento di dieci volte. Fra qualche secolo, perciò, non sarà forse irragionevole immaginare un acceleratore per la produzione di antimateria delle dimensioni di un’astronave. L’attuale riluttanza dei governi a sostenere costose ricerche in questo campo potrebbe far considerare eccessivo un simile ottimismo, ma nell’arco di un paio di secoli in politica possono cambiare molte cose.

Quand’anche si pervenisse a produrre antimateria a bordo di una nave spaziale, ci si dovrebbe ancora confrontare col fatto che, per produrre un antiprotone, si consumerebbe invariabilmente più energia di quella che se ne ricaverebbe poi. Perché mai si dovrebbe quindi volere spendere quest’energia nella produzione di antimateria quando la si potrebbe trasformare direttamente in propulsione?

Gli autori di *Star Trek,* sempre aggiornatissimi, presero in considerazione anche questo problema. La loro risposta fu semplice. Mentre l’energia disponibile in altre forme potrebbe essere usata per la propulsione a impulso, e quindi a velocità inferiori a quella della luce, *solo* le reazioni fra materia e antimateria potrebbero essere usate per alimentare il motore di curvatura. E poiché il motore di curvatura potrebbe allontanare un’astronave da un pericolo molto più rapidamente di un motore a impulso, l’energia extra spesa per produrre l’antimateria non sarebbe certo uno spreco in una situazione di emergenza. Gli autori aggirarono anche i problemi della produzione di antimateria fondata su acceleratori inventando un nuovo metodo per la sua produzione. Essi proposero ipotetici «dispositivi quantici di inversione della carica», i quali dovrebbero semplicemente cambiare la carica delle particelle elementari, permettendo di convertire nel modo più semplice

protoni e neutroni nelle loro antiparticelle. Secondo il *Next Generation Technical Manual* questo processo, pur permettendo una produzione incredibilmente intensiva di energia, comporterebbe una perdita netta di energia del solo 24 per cento: di vari ordini di grandezza inferiore alle perdite descritte sopra per l'uso degli acceleratori.

Benché tutto questo sia molto attraente, purtroppo la semplice inversione della carica elettrica di un protone non basta. Consideriamo, per esempio, il fatto che tanto i neutroni quanto gli antineutroni sono elettricamente neutri. Tutte le antiparticelle hanno i «numeri quantici» (le etichette che descrivono le loro proprietà) opposti rispetto a quelli delle corrispondenti particelle. Poiché i quark che compongono i protoni posseggono molte altre etichette oltre alla carica elettrica, per compiere la transizione dalla materia all'antimateria si dovrebbero avere molti altri «dispositivi quantici di inversione».

In ogni caso, il manuale tecnico ci dice che, eccezion fatta per la produzione di emergenza di antimateria a bordo delle navi spaziali, tutta l'antimateria della Flotta stellare viene prodotta negli impianti per la produzione di carburante della Flotta stessa. Qui antiprotoni e antineutroni vengono combinati a formare i nuclei dell'anti-idrogeno pesante. Il fatto particolarmente divertente è che gli ingegneri della Flotta stellare aggiungono poi antielettroni (cioè positroni) a questi nuclei elettricamente carichi per produrre atomi di anti-idrogeno pesante neutri, forse perché gli autori di *Star Trek* hanno l'impressione che antiatomi neutri siano più facilmente manipolabili di antinuclei dotati di carica elettrica. (In realtà in laboratorio non è mai stato creato alcun antiatomo, anche se relazioni recenti da Harvard ci inducono a pensare che in questo decennio siamo sulla soglia della produzione di un atomo di anti-idrogeno.) Purtroppo gli antiatomi neutri sollevano gravi problemi di contenimento perché i campi magnetici, che sono assolutamente essenziali per la manipolazione di quantità consistenti di antimateria senza produrre catastrofi, funzionano *solo* per oggetti dotati di carica elettrica! Ma torniamo ai nostri calcoli…

La capacità totale di carico di antimateria per un'astronave è di circa 3000 metri cubi, distribuiti in vari scomparti distaccabili (sul ponte 42 nell'*EnterpriseD).* Si sostiene che questo carico è sufficiente per una missione di tre anni. Solo per divertimento, stimiamo quanta energia si potrebbe ottenere da questa quantità di antimateria se venisse immagazzinata nella forma di nuclei di anti-idrogeno pesante. Supporrò che i nuclei siano trasportati nella forma di un plasma rarefatto, che sarebbe probabilmente più facile da contenere magneticamente di un liquido o di un solido. In questo caso, 3000 metri cubi corrisponderebbero a circa 5 milioni di grammi del materiale (5 tonnellate). Consumando, in reazioni di annichilazione, un grammo al secondo, si avrebbe una produzione di energia equivalente all'energia totale consumata attualmente ogni giorno dal genere umano. Come ho detto in precedenza a proposito del motore di curvatura, a bordo di una nave spaziale si dev'essere pronti a produrre almeno questa quantità di energia. Si potrebbe continuare a usare il combustibile a questo ritmo per 5 milioni di secondi, ossia per quasi due mesi. Supponendo che un'astronave usi durante le sue missioni il motore a materia-antimateria per il 5 per cento del tempo, la quantità di antimateria indicata potrebbe assicurare alla nave spaziale la copertura del consumo normale per il tempo richiesto di tre anni.

In relazione alla quantità di antimateria richiesta per la produzione di energia è importante anche un altro fatto (che gli autori di *Star Trek* hanno di tanto in tanto deciso di ignorare) : l'annichilazione materia-antimateria è una proposizione del tipo tutto o nulla. Non è un fenomeno che ammetta una regolazione continua. Quando si cambia il rapporto della materia all'antimateria nel motore di curvatura, non si cambia il rapporto assoluto di generazione di potenza. La potenza relativa rispetto al «carburante» usato diminuirà solo ce c'è uno spreco di una parte del carburante, ossia se ci sono particelle di materia che non trovano antimateria con cui annichilarsi, o se entrano semplicemente in collisione senza annichilarsi. In vari episodi (*Al di là del tempo, Il figlio della Galassia, La pelle del male*) il rapporto fra materia e antimateria viene variato, e nel manuale tecnico di *Star Trek* si dice che questo rapporto varia in modo continuo da 25 : 1 a 1 : 1, in funzione della velocità curvatura (il rapporto 1 : 1 viene usato alla curvatura 8 o più). Per velocità superiori alla curvatura 8 si aumenta la quantità dei reagenti, lasciando però immutato il rapporto. La variazione della quantità dei reagenti e non del rapporto dovrebbe essere sempre il modo di procedere appropriato, come dovrebbero sapere anche gli allievi ufficiali della Flotta stellare. Wesley Crusher lo chiarì quando sottolineò, in *L'età della ragione,* che la domanda d'esame alla Flotta stellare sui rapporti materia-antimateria era un trabocchetto e che c'era un solo rapporto possibile, ossia 1:1.

Gli autori di *Star Trek* aggiunsero infine un componente più cruciale al motore a materia-antimateria. Mi riferisco ai famosi cristalli di dilitio (curiosamente inventati dagli autori di *Star Trek* molto tempo prima che i tecnici del Fermilab decidessero di usare un bersaglio di litio nella loro sorgente di antiprotoni). Sarebbe impensabile non menzionarli, dal momento che sono un elemento centrale del motore di curvatura e che, in quanto tali, figurano con grande rilievo nell'economia della Federazione e in varie vicende. (Per esempio, senza l'importanza economica del dilitio, l'*Enterprise* non sarebbe mai stata mandata nel sistema di Halkan per assicurare i suoi diritti minerari e noi non saremmo mai stati trasportati nell'universo rovesciato in cui la Federazione è un impero malvagio!).

Quale funzione assolvono i cristalli di dilitio, questa notevole invenzione degli autori di *Star Trek?* Questi cristalli (noti

anche con la loro formula più lunga: 2<5>6-dilitio-2<:>l-diallosilicato-l:9:l-eptoferranuro) possono regolare il ritmo di annichilazione di materia e antimateria, in quanto sarebbero l'unica forma di materia nota «porosa» all'antimateria.

Io interpreto generosamente queste notizie nel modo seguente: i cristalli sono atomi disposti in modo regolare in un reticolo: suppongo perciò che gli atomi di anti-idrogeno siano disposti lungo i reticoli dei cristalli di dilitio, rimanendo perciò a distanze fisse sia dagli atomi della materia normale sia fra loro. In questo modo il dilitio potrebbe regolare la densità dell'antimateria, e quindi il ritmo di reazione di materia e antimateria.

La ragione per cui mi preoccupo di inventare questa spiegazione ipotetica dell'utilità di un materiale a sua volta ipotetico è, per affermarlo ancora una volta, che gli autori di *Star Trek* erano secondo me in anticipo sul loro tempo. Un argomento simile, almeno in spirito, fu proposto molti anni dopo la presentazione dell'annichilazione di materia e antimateria mediata dal dilitio da parte di *Star Trek,* per giustificare un processo ugualmente esotico: la fusione fredda. All'apogeo dell'entusiasmo per questo presunto fenomeno, che durò sei mesi circa, qualcuno sostenne che, combinando chimicamente vari elementi, si potevano indurre i nuclei degli atomi a reagire con molto maggiore rapidità, e si potevano quindi produrre a temperatura ambiente le stesse reazioni di fusione che il Sole riesce a produrre solo in condizioni di grande densità e con temperature di oltre un milione di gradi.

Uno dei molti aspetti discutibili delle argomentazioni sulla fusione fredda che resero sospettosi i fisici fu il fatto che le reazioni chimiche e il legame atomico sono alla scala della grandezza dell'atomo, la quale è maggiore di un fattore 10.000 rispetto a quella della grandezza dei nuclei. È difficile credere che reazioni che hanno luogo a scale così grandi rispetto a quella delle dimensioni nucleari possano influire sulla rapidità delle reazioni nucleari. Tuttavia, fino a quando non ci si rese conto che altri gruppi non riuscivano a riprodurre i risultati annunciati, molte persone spesero molto tempo a cercare di capire come potesse essere possibile un tale miracolo.

Poiché gli autori di *Star Trek,* diversamente dai fautori della fusione fredda, non pretesero mai di scrivere qualcosa di diverso da storie di fantascienza, penso che dovremmo essere disposti a concedere loro una piccola libertà extra. Dopo tutto, le reazioni mediate dal dilitio si limitano ad aiutare quello che è senza dubbio l'aspetto più convincentemente realistico della tecnologia delle navi spaziali: i motori a materia-antimateria. E potrei aggiungere che negli esperimenti moderni si usano effettivamente cristalli – in questo caso non di dilitio ma di tungsteno – per moderare, o rallentare, fasci di antielettroni (positroni) ; in questi esperimenti gli antielettroni diffondono il campo elettrico nel cristallo e perdono energia.

Nell'universo non c'è alcun modo di spendere meglio il nostro dollaro che prendere una particella e annichilarla con la sua antiparticella per produrre energia di radiazione pura. Questa è la forma più avanzata della propulsione a razzo, e sarà usata sicuramente se mai porteremo i razzi alle loro ultime conseguenze. Il fatto che per realizzarla possa occorrere qualche dollaro in più è un problema di cui possiamo lasciare che si preoccupino i politici del XXIII secolo.

7. Olografia e ponte ologrammi

“Oh, noi siamo noi, signore.
Anche loro sono noi.
Così, sia noi che loro siamo noi.”
Data a Picard e Riker, in *Ricordare Parigi*

QUANDO Humphrey Bogart disse a Ingrid Bergman, all’aeroporto di Casablanca, «Ci resterà sempre Parigi», intendeva dire, ovviamente, il ricordo di Parigi. Quando Picard disse qualcosa di simile a Jenice Manheim durante la ricostruzione, sul ponte ologrammi, del Café des Artistes, può darsi che intendesse la frase in senso più letterale. Grazie al ponte ologrammi si possono far rivivere i ricordi, si possono rivisitare i luoghi preferiti e riscoprire amori perduti, o quasi.

Il ponte ologrammi è una fra le conquiste tecniche più affascinanti a bordo *dell’Enterprise.* Per chiunque abbia già familiarità col mondo nascente della realtà virtuale, o attraverso videogiochi o attraverso i computer ad alta velocità più avanzati, le possibilità offerte dal ponte ologrammi sono particolarmente attraenti. Chi non vorrebbe entrare, con solo un breve preavviso, nel mondo della propria fantasia?

Questa prospettiva è in effetti così seducente che, secondo me, la sua attrazione sarebbe nella realtà molto più forte di quanto non risulti essere nella serie. Abbiamo qualche indizio della forza di questa «olodipendenza» negli episodi *Illusione o realtà* e *Il figlio della Galassia.* Nel primo l’ufficiale nevrotico, beniamino di tutti gli spettatori, Reginald Barclay, diventa dipendente della sua visione fantastica degli ufficiali superiori *dell’Enterprise,* e preferisce avere rapporti con loro sul ponte ologrammi che in qualsiasi altro luogo della nave. Nel secondo episodio, quando Geordi La Forge incontra nella realtà la dottoressa Brahms, la progettista dei motori dell’astronave – da lui idealizzata sul ponte ologrammi –, le cose si complicano.

Dati i passatempi piuttosto cerebrali a cui l’equipaggio generalmente si dedica sul ponte ologrammi, si può immaginare che gli istinti ormonali che spingono l’umanità del XX secolo si siano un po’ più evoluti nel XXIII secolo (anche se, in questo caso, Will Riker non potrà essere considerato rappresentativo dei suoi simili). Fondandomi su ciò che so del mondo di oggi, mi sarei atteso che il ponte ologrammi fosse dominato in gran parte dal sesso. (Esso avrebbe dato in effetti un significato del tutto nuovo all’espressione sesso sicuro.) Non sto scherzando. Il ponte ologrammi rappresenta quel che c’è di più attraente nella fantasia, e in particolare nella fantasia sessuale: azioni senza conseguenze, piacere senza dolore, e situazioni che possono essere ripetute e perfezionate a volontà.

Di tanto in tanto nella serie si allude ai possibili piaceri nascosti del ponte ologrammi. Per esempio, dopo essersi intromesso in modo piuttosto pesante sulla fantasia privata di Reg sul ponte ologrammi, Geordi ammette: «Anch’io ho passato molto tempo sul ponte ologrammi. Ora, per quanto mi riguarda, quello che fa sul ponte ologrammi sono affari suoi, a meno che questo non interferisca con il suo lavoro». Se queste affermazioni non suonano come un’ammonizione del xx secolo contro i rischi dei piaceri della carne, non so che cos’altro possano significare.

Ho pochi dubbi sul fatto che le esplorazioni provvisorie della realtà virtuale tentate nel nostro secolo stiano guidandoci in direzione di qualcosa di molto simile al ponte ologrammi, almeno in spirito. Forse le mie preoccupazioni potrebbero apparire nel XXIII secolo altrettanto eccentriche degli ammonimenti che accolsero mezzo secolo fa l’invenzione della televisione. Dopo tutto, anche se continuano le proteste contro l’eccesso di sesso e violenza in TV, senza la televisione non ci sarebbe *Star Trek.*

Il pericolo che noi possiamo diventare una nazione di pantofolai non esiste in un mondo pieno di ponti ologrammi personali, o forse di ponti ologrammi a ogni angolo di strada; chi gioca con gli ologrammi ha un atteggiamento tutt’altro che passivo. Io trovo però ancora preoccupante la prospettiva della realtà virtuale, proprio perché, pur apparendo reale, spaventa molto meno della vita reale. L’attrazione di un mondo di esperienze sensuali dirette senza conseguenze potrebbe essere irresistibile.

Tuttavia, ogni nuova tecnologia ha aspetti negativi oltre che positivi, e ci costringe ad adattare il nostro comportamento. È probabilmente chiaro dal tono di questo libro che secondo me la tecnologia ha nel complesso migliorato piuttosto che peggiorato la nostra vita. La sfida di adattarci alle nuove tecnologie è solo una parte della sfida di far parte di una società umana in evoluzione.

In ogni caso il ponte ologrammi differisce in un modo sorprendente dalla maggior parte delle tecnologie della realtà virtuale oggi in corso di sviluppo. Attualmente, attraverso l’uso di dispositivi che si applicano sulla persona e che influiscono sulla nostra visione e sul nostro input sensoriale, la realtà virtuale è progettata in modo da portare la «scena» dentro di noi. Il ponte ologrammi adotta una linea più originale: mette noi dentro la scena, e lo fa in parte attraverso un uso inventivo dell’olografia e in parte mediante replicazione.

I prìncipi su cui si fonda l’olografia furono chiariti per la prima volta nel 1947 – molto tempo prima che fosse

disponibile una tecnologia in grado di realizzarla – dal fisico britannico di origine ungherese Dennis Gabor, che in seguito vinse per la sua ricerca il premio Nobel. Oggi la maggior parte delle persone ha familiarità con l'uso di immagini olografiche tridimensionali su carte di credito, e persino sulla copertina di libri. La parola «ologramma» deriva da due parole greche, *holos,* che significa «tutto, intero», e *gramma,* dallo stesso tema di *grafo,* che significa «cosa scritta, disegno, grafico». Diversamente dalle normali fotografie, che si limitano a darci un'immagine bidimensionale di uno o più oggetti tridimensionali, gli ologrammi si propongono di offrirci un'immagine completa, totale, degli stessi oggetti. Con l'olografia è in effetti possibile ricreare un'immagine tridimensionale attorno alla quale si può camminare e che può essere osservata da tutti i lati, come se fosse l'oggetto originario. L'unico modo per distinguere un ologramma dall'oggetto reale è quello di provare a toccarlo. Soltanto allora ci si rende conto che esso non ha niente di tangibile.

Come può un pezzo di pellicola bidimensionale, quella su cui viene registrata l'immagine olografica, contenere l'intera informazione su un oggetto tridimensionale? Per rispondere a questa domanda dobbiamo riflettere un po' su che cosa vediamo esattamente quando vediamo qualcosa, e su che cosa registri esattamente una fotografia.

Noi vediamo degli oggetti in conseguenza del fatto che o emettono o riflettono della luce, che arriva poi ai nostri occhi. Quando un oggetto tridimensionale è illuminato, diffonde la luce in molte direzioni diverse a causa della sua tridimensionalità. Se riuscissimo in qualche modo a riprodurre l'esatta configurazione della luce divergente che si crea quando della luce è diffusa da un oggetto reale, i nostri occhi non sarebbero in grado di distinguere la differenza fra l'oggetto reale e la configurazione di luce *senza* l'oggetto. Muovendo la testa, per esempio, saremmo in grado di vedere particolari in precedenza nascosti, poiché sarebbe stata ricreata l'intera configurazione della luce diffusa da tutte le parti dell'oggetto.

Come possiamo prima registrare e poi ricreare tutta questa informazione? Possiamo farci un'idea intuitiva del problema pensando a che cosa registri effettivamente una normale fotografia, la quale prima fissa e poi ricrea un'immagine bidimensionale. Quando facciamo una fotografia, esponiamo alla luce incidente, che arriva attraverso l'obiettivo della macchina fotografica, un materiale fotosensibile: Questo materiale, reagendo successivamente nel bagno di sviluppo con varie sostanze chimiche, si annerisce in proporzione all'intensità della luce che è caduta su di esso. (Sto riferendomi qui alla fotografia in bianco e nero, ma è facile estendere lo stesso ragionamento al colore: basta rivestire la pellicola di tre sostanze, ognuna delle quali sia sensibile a un colore primario diverso della luce.)

Il contenuto totale d'informazione registrato su una pellicola fotografica è quindi l'intensità della luce che arriva su ogni punto del materiale fotosensibile. Quando sviluppiamo la pellicola, i punti su di essa che sono stati esposti a una maggiore intensità di luce reagiranno alle sostanze chimiche del bagno di sviluppo diventando più scure, mentre quelle non altrettanto esposte resteranno più chiare. L'immagine risultante sulla pellicola sarà una proiezione bidimensionale «negativa» del campo illuminato originario. Possiamo allora proiettare della luce attraverso questa negativa su un foglio di carta sensibile alla luce, che ci fornirà, dopo lo sviluppo e il fissaggio dell'immagine, la fotografia finale. Quando guardiamo la fotografia, la luce che colpisce le sue aree chiare verrà in prevalenza riflessa, mentre la luce che colpisce le aree più scure sarà in gran parte assorbita. La visione della luce riflessa dalla fotografia produce quindi sulla nostra retina una configurazione bidimensionale, la quale ci permette di ricostruire un'immagine bidimensionale della scena.

La domanda diventa quindi: che cos'altro c'è da registrare qui oltre alla sola intensità della luce in ciascun punto? Ancora una volta dobbiamo fondarci sul fatto che la luce è un'onda. In conseguenza di questo fatto, non è sufficiente la sola intensità per caratterizzarne la configurazione. Consideriamo l'onda luminosa illustrata alla figura 8.

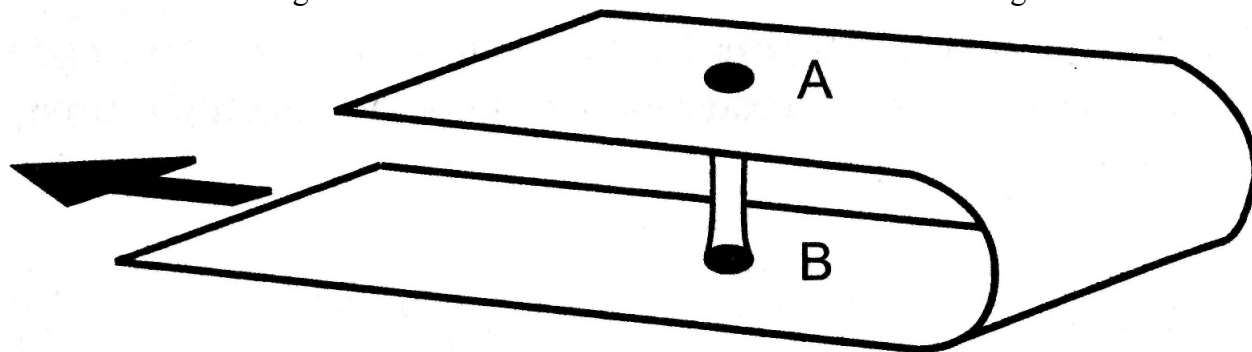



Figura 8

Nella posizione *A* l'onda, che in questo caso rappresenta l'intensità del campo elettrico, ha il suo massimo valore, corrispondente a un campo elettrico con intensità E_A , diretto verso l'alto. Nel punto *B* il campo ha esattamente la stessa intensità ma è diretto verso il basso. Ora, se siamo sensibili solo all'intensità dell'onda luminosa, troveremo che il campo ha la stessa intensità in A e in *B.* Come però si può vedere, la posizione *B* rappresenta una parte diversa dell'onda rispetto alla

posizione *A.* Questa «posizione» lungo l'onda si chiama *fase.* Risulta che si può specificare tutta l'informazione associata a un'onda in un punto dato fornendone l'intensità e la fase. Così, per registrare tutta l'informazione sulle onde luminose diffuse da un oggetto tridimensionale, dobbiamo trovare un modo per registrare su una pellicola sia l'intensità sia la fase della luce diffusa.

Il compito non è difficile. Se si divide un fascio di luce in due partì e se ne proietta una direttamente sulla pellicola, lasciando diffondere l'altra sull'oggetto prima di colpire la pellicola, può accadere una di due cose. Se le due onde luminose sono «in fase» – ossia se entrambe hanno creste coincidenti in un punto *A* – l'ampiezza dell'onda risultante in *A* sarà doppia dell'ampiezza di ognuna delle due onde singole, come si vede nella figura 9.

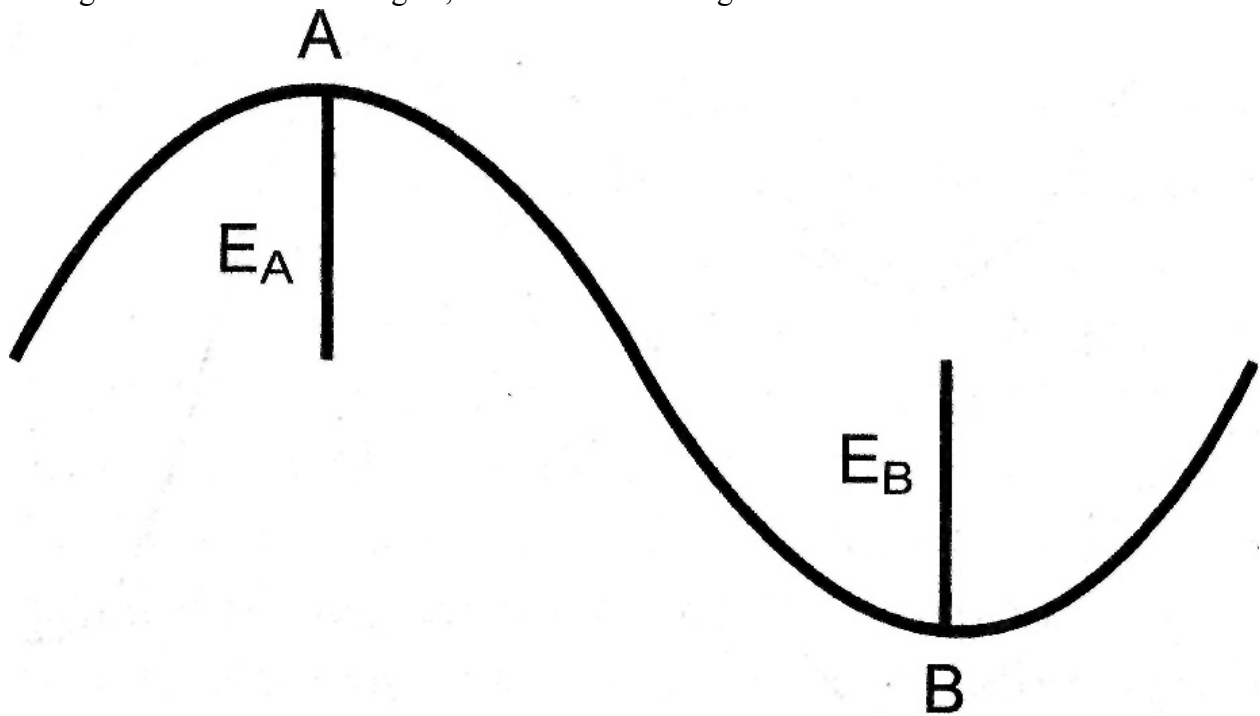



Figura 9

Se invece le due onde sono sfasate nel punto *A,* si cancelleranno reciprocamente, e l'«onda» risultante in *A* avrà ampiezza zero (figura 10).

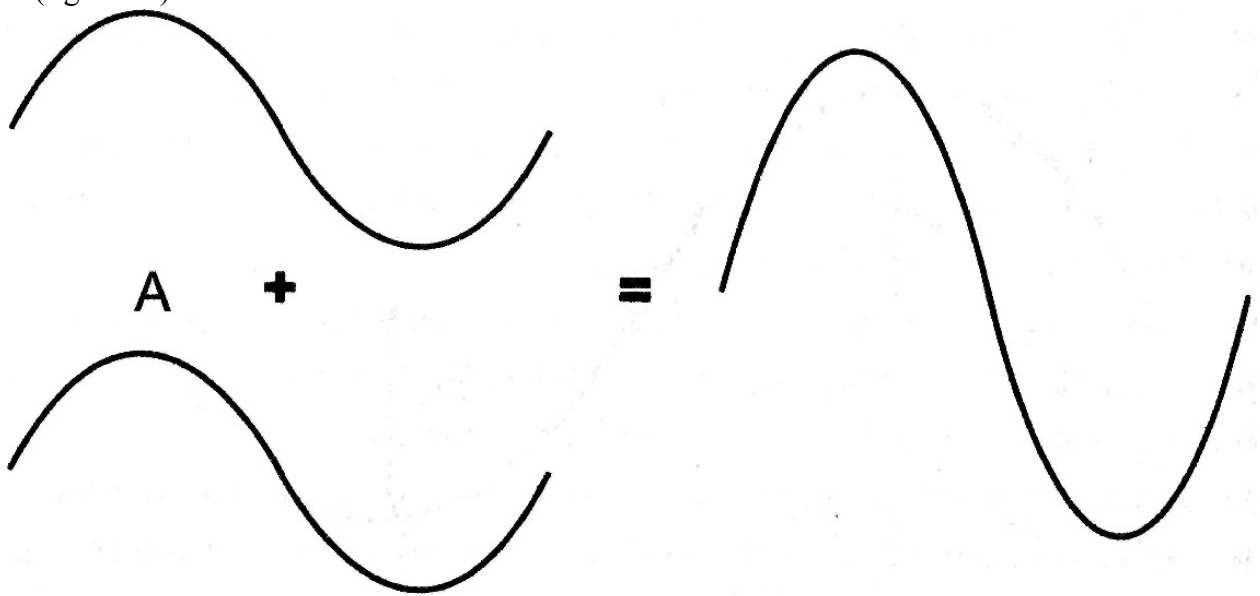



Figura 10

Se, ora, la pellicola nel punto *A* è pellicola fotografica, che registra solo l'intensità, la configurazione registrata sarà la «figura d'interferenza» delle due onde: il fascio di riferimento e il fascio della luce diffusa dall'oggetto. Questa figura contiene non solo l'informazione sull'intensità della luce diffusa dall'oggetto, ma anche informazione sulle fasi della luce. Se si è sufficientemente abili, si può estrarre quest'informazione per ricreare un'immagine tridimensionale dell'oggetto che ha diffuso la luce.

In realtà non c'è neppure bisogno di essere poi tanto abili. Se ci si limita a illuminare la pellicola fotografica con una sorgente di luce della medesima lunghezza d'onda della luce originaria che ha prodotto la figura d'interferenza, guardando in

trasparenza la pellicola si creerà un'immagine dell'oggetto esattamente là dove l'oggetto si trovava in relazione alla pellicola. Muovendo la testa da un lato si potranno vedere anche parti dell'oggetto in precedenza non visibili, come se ci si trovasse davanti non a un'immagine dell'oggetto bensì all'oggetto reale. Se si copre la maggior parte della pellicola, la si avvicina ai propri occhi e si guarda attraverso la parte scoperta, si potrà ancora vedere l'intero oggetto! In questo senso, quest'esperienza è molto simile a quella di guardare una scena da una finestra, con l'eccezione che in realtà la scena che stiamo guardando non c'è. La luce che perviene al nostro occhio attraverso la pellicola viene modificata in modo tale da far credere ai nostri occhi che sia stata diffusa da oggetti. Quelli che «vediamo», però, non sono oggetti, bensì un ologramma.

Normalmente nella produzione di ologrammi, per poter meglio controllare la luce di riferimento e la luce diffusa proveniente dall'oggetto, si usa luce laser, che è coerente e ben collimata. Esistono però anche ologrammi, i cosiddetti ologrammi «in luce bianca», che possono essere osservati con luce comune.

Possiamo anche usare procedimenti più complessi e fare in modo, per esempio usando varie lenti, che l'immagine degli oggetti che osserviamo appaia fra noi e la pellicola; in questo caso vedremo dinanzi a noi l'immagine tridimensionale, attorno alla quale potremo camminare e che potremo osservare da tutti i lati. Oppure possiamo far sì che la sorgente di luce sia davanti alla pellicola anziché essere dietro di essa, come negli ologrammi sulle carte di credito.

Il primo tipo di ologramma è presumibilmente quello usato sul ponte ologrammi; si fa probabilmente ricorso alla stessa tecnica per ricreare l'immagine di un medico nell'infermeria di bordo, come nella serie *Voyager.* Inoltre, nella produzione di tali ologrammi, non c'è bisogno di avere oggetti originali per realizzare le immagini olografiche. Oggi i computer digitali sono abbastanza avanzati da poter calcolare la configurazione di luce diffusa da un qualsiasi ipotetico oggetto che si voglia disegnare sullo schermo e illuminare da qualsiasi angolo. Analogamente, il computer potrebbe determinare la forma della figura d'interferenza prodotta fondendo la luce di un fascio diretto con la luce diffusa da un oggetto. La figura d'interferenza così generata potrebbe essere proiettata su uno schermo trasparente, e quando questo schermo viene illuminato da dietro si forma un'immagine tridimensionale di un oggetto che in realtà non è mai esistito. Se il computer è abbastanza veloce, può proiettare sullo schermo una figura d'interferenza variabile in modo continuo, producendo in tal modo un'immagine tridimensionale in movimento. L'aspetto olografico del ponte ologrammi non è quindi una fantasia particolarmente forzata.

Ma sul ponte ologrammi non c'è solo l'olografia. Come abbiamo osservato, gli ologrammi non hanno alcuna sostanza corporea. Si può camminare attraverso un ologramma, o sparare attraverso di esso, come ci mostrano le meravigliose rappresentazioni olografiche create da Spock e Data per ingannare i Romulani nell'episodio *Il segreto di Spock.* Quest'incorporeità non si concilia però con il nostro desiderio di toccare gli oggetti e le persone con cui desideriamo interagire sul ponte ologrammi. A tal fine si richiedono tecniche più esoteriche, e gli autori di *Star Trek* hanno fatto ricorso al teletrasporto, o meglio ai replicatori, che sono una versione meno avanzata del teletrasporto. Presumibilmente, usando la tecnologia del teletrasporto, si replica della materia, la quale viene poi fatta muovere sul ponte ologrammi in modo che assomigli esattamente agli esseri in oggetto, accuratamente coordinati da programmi per computer che controllano le voci e i movimenti degli esseri ricreati. Similmente, i replicatori riproducono gli oggetti inanimati della scena: tavoli, sedie e via dicendo. Questa «materia del ponte ologrammi» deve la sua forma agli schemi memorizzati nel buffer dei replicatori. Quando si disattiva il teletrasporto o si elimina l'oggetto dal ponte ologrammi, la materia può scomporsi altrettanto facilmente che se, durante il processo del trasporto, si spegnesse il buffer. Ma può anche accadere che creature prodotte con la materia del ponte ologrammi rimangano intrappolate sul ponte, come scoprirono con sgomento i detective Cyrus Redblock e Felix Leach nell'episodio *Il grande addio* della serie *The Next Generation,* e come il mortale nemico di Sherlock Holmes, il professor Moriarty sospettò e poi tentò di evitare in vari altri episodi.

Ecco quindi l'idea che mi sono fatto io del ponte ologrammi: gli ologrammi dovrebbero essere efficaci attorno alle pareti, per dare l'impressione di trovarsi in uno spazio tridimensionale esteso fino all'orizzonte, e i replicatori fondati sul teletrasporto creerebbero quindi gli oggetti «solidi» in movimento dentro la scena. Poiché l'olografia è realistica, mentre (come ho spiegato in precedenza) il teletrasporto non lo è, per creare un ponte ologrammi funzionante si dovrebbe trovare qualche altro modo per plasmare e far muovere la materia. Tuttavia una delle due tecnologie a disposizione non è male. In effetti, recentemente ho visitato una moderna «*cave*»[13] video tridimensionale alla Banff School of Fine Art in Canada, che assomigliava molto fedelmente alla parte realistica del «ponte ologrammi» che ho descritto sopra. Anche se gli ologrammi non venivano usati per creare le immagini tridimensionali, si potevano tuttavia manipolare le immagini generate al computer sulle pareti della «caverna» in modo tale che, guardate con occhiali 3D, si muovessero nella stanza sotto il proprio controllo.

Quali prospettive hanno gli ologrammi puri, come il medico olografico della serie *Voyager*? La risposta è: assolutamente nessuna. Temo che, usando solo la luce diffusa dagli oggetti e niente materia, queste immagini non sarebbero molto efficaci nel sollevare, manipolare o sondare. Tuttavia un ologramma può fornire altrettanto facilmente di un medico vero l'assistenza

al capezzale del malato e le parole di incoraggiamento e di consiglio che sono al cuore dell'attività di un buon medico.

Sezione terza:
l’universo invisibile, ossia cose che cozzano nella notte

In cui parliamo di cose che potrebbero esistere ma che non sono ancora state osservate: la vita extraterrestre, molte dimensioni, e uno zoo esotico di altre possibilità e impossibilità della fisica.

8. Alla ricerca di Spock

"È difficile fare un lavoro di gruppo quando si è onnipotenti."
Q, quando si unisce all'equipaggio dell'*Enterprise*, in *Déjà Q*

«UN'AGGRESSIVITÀ continua, conquiste territoriali e genocidi… ogni volta che se ne dia la possibilità… La colonia è integrata come se fosse un organismo governato da un genoma che impone un comportamento e lo rende possibile… Il superorganismo fisico agisce in modo da adattare il miscuglio demografico al fine di ottimizzare l'economia della sua energia… Le regole austere non permettono né gioco, né arte, né empatia.»

I Borg sono fra le specie più terribili e interessanti di creature aliene mai apparse su uno schermo televisivo. Ciò che li rende così affascinanti, dal mio punto di vista, è il fatto che un organismo del genere sembra plausibile sulla base della selezione naturale. Di fatto, benché il paragrafo citato sopra fornisca una descrizione appropriata dei Borg, non è tratto da un episodio della serie *Star Trek.* Esso appare invece in una recensione del libro di Bert Hölldobler ed Edward O. Wilson, *Journey to the Ants,* ed è una descrizione non dei Borg, bensì di nostri amici insetti terrestri, le formiche.[14] Questi insetti sociali hanno avuto un successo notevole nella scala dell'evoluzione, e non è difficile capire perché. E impossibile immaginare che una società avanzata si sviluppi in un superorganismo simile? Affinamenti intellettuali come l'empatia sarebbero necessari a una tale società? Oppure rappresenterebbero un ostacolo?

Gene Roddenberry ha detto che il vero scopo dell'astronave *Enterprise* era quello di servire di veicolo non a viaggi spaziali ma al racconto di storie. Al di là di tutte le stregonerie tecniche, anche un patito della tecnologia come me deve riconoscere che ciò che rende palpitante *Star Trek è* il dramma, gli stessi grandi temi che hanno alimentato il racconto di Storie dall'epica greca in poi: amore, odio, tradimento, gelosia, fiducia, gioia, paura, meraviglia… Noi tutti siamo particolarmente sensibili a storie che illuminano le emozioni centrali nella nostra vita. Se il motore di curvatura fosse usato semplicemente per far viaggiare sonde senza equipaggio, se il teletrasporto fosse stato sviluppato semplicemente per trasferire campioni di suolo, se gli scanner medici fossero usati solo su organismi vegetali, *Star Trek* non sarebbe mai andato oltre la prima stagione.

In effetti la continua missione della nave spaziale *Enterprise* non ha l'obiettivo di investigare ulteriormente le leggi della fisica, bensì di «esplorare strani nuovi mondi, nella ricerca di nuove forme di vita e nuove civiltà». Quel che rende *Star Trek* così affascinante – e che ne assicura secondo me un successo così duraturo – è il fatto di permettere, al dramma umano di estendersi molto oltre l'ambito umano. Giungiamo a immaginare come specie aliene potrebbero svilupparsi e affrontare gli stessi problemi che si pongono all'umanità. Ci troviamo esposti a nuove culture immaginarie, a nuove minacce. *Star Trek* ci fornisce un'emozione simile a quella di visitare per la prima volta un paese straniero, o a quella di scoprire, nella lettura di libri di storia, differenze e somiglianze fra due popoli vissuti a vari secoli di distanza fra loro.

Per poterci divertire con *Star Trek* dobbiamo, ovviamente, sospendere la diffidenza. Cosa notevole, quasi tutte le specie aliene incontrate dall'*Enterprise* sono simili all'uomo e parlano tutte l'inglese! (A propria difesa, nella sesta stagione della serie *The Next Generation* gli autori di *Star Trek* inventarono una giustificazione. L'archeologo Richard Galen scopre a quanto pare che molte di queste civiltà condividono materiale genetico, che fu disseminato negli oceani primordiali di molti mondi diversi da qualche civiltà molto antica. Questa è una nozione che ricorda la teoria della panspermia guidata, solo in parte ironica, del premio Nobel Francis Crick[15].) Questo fatto non è sfuggito a nessun trekker, e mi fu segnalato nel modo forse più colorito dal fisico teorico e premio Nobel Sheldon Glashow, il quale disse degli alieni: «Sembrano tutti persone affette da elefantiasi!» Egli è tuttavia disposto, come la maggior parte dei trekker, a ignorare questi espedienti per apprezzare appieno l'esplorazione, da parte degli autori di *Star Trek,* di psicologie aliene. Gli sceneggiatori di Hollywood non sono in generale né scienziati né tecnici, e quindi è naturale attendersi che la maggior parte della loro energia creativa vada alla progettazione di culture aliene più che di una biologia aliena.

E creativi lo sono stati davvero. Oltre ai Borg e all'onnipotente istrione Q più di duecento forme di vita specifiche popolavano l'universo di *Star Trek* quando rinunciai a contarle. La nostra Galassia è a quanto pare piena di altre civiltà intelligenti, alcune più avanzate, altre meno. Alcune, come la Federazione, i Klingon, i Romulani e i Cardassiani, controllano grandi imperi, mentre altre esistono in condizioni di isolamento su singoli pianeti o nel vuoto dello spazio.

La scoperta di esseri intelligenti extraterrestri potrebbe essere, come sottolineano i ricercatori in questo campo, la massima scoperta nella storia del genere umano. Senza dubbio è difficile immaginare una scoperta in grado di cambiare in misura maggiore la nostra visione di noi stessi e del nostro posto nell'universo. Tuttavia, dopo tre decenni di ricerche concertate, non abbiamo ancora trovato alcuna prova definitiva di forme di vita esterne al nostro pianeta. Qualcuno potrebbe

trovare sorprendente questo fatto. Senza dubbio, se là fuori c'è vita, sembra inevitabile che dovremmo trovarla, proprio come molte delle civiltà emerse indipendentemente su vari continenti qui sulla Terra finirono per incontrarsi, e a volte per scontrarsi traumaticamente.

Se però pensiamo in modo un po' meno generico alla probabilità di scoprire forme di vita intelligente nell'universo, diventa chiara l'immensa difficoltà della ricerca. Consideriamo, per esempio, la possibilità che una qualche civiltà della Galassia fosse stata in qualche modo informata su dove cercare esattamente fra i 400 miliardi di stelle circa della Via Lattea per trovare un pianeta in grado di sostenere la vita. Supponiamo inoltre che gli appartenenti a tale civiltà avessero avuto l'indicazione di guardare nella direzione del nostro Sole. Quante probabilità avrebbero avuto, anche avendo ricevuto tali indicazioni, di scoprire la nostra esistenza? La vita esiste sulla Terra da gran parte dei 4,5 miliardi di anni trascorsi da quando il nostro pianeta ha avuto origine, ma solo nell'ultimo mezzo secolo circa abbiamo trasmesso qualche segnale della nostra esistenza. Inoltre, solo negli ultimi 25 anni circa abbiamo avuto radiotelescopi abbastanza potenti da poter usare come radiofari osservabili da altre civiltà. Così, sugli ultimi 4,5 miliardi di anni in cui alieni intelligenti possono avere osservato la Terra dallo spazio, essi avrebbero potuto scoprirci solo nell'ultimo mezzo secolo. Supponendo che una civiltà aliena avesse deciso di fare le proprie osservazioni in un qualche tempo scelto a caso durante la storia del pianeta, la probabilità di scoprire la nostra esistenza sarebbe stata di uno su un milione. E vi ricordo che questa probabilità vale solo nell'ipotesi che tali alieni avessero già avuto indicazioni esatte su dove cercare!

Sono stati scritti interi libri sulla possibilità che esistano forme di vita altrove nella Galassia, nonché sulle probabilità di scoprirle. Le stime del numero delle civiltà avanzate vanno da milioni da parte degli ottimisti a una da quello dei pessimisti (considerando generosamente avanzata la nostra civiltà). Non intendo passare in rassegna in modo dettagliato tutti gli argomenti che sono stati avanzati. Vorrei però descrivere alcuni fra gli argomenti fisici più interessanti connessi all'origine delle forme di vita che l'*Enterprise* fu inviata a scoprire, e discutere alcune fra le strategie usate attualmente sulla Terra per cercarle.

L'argomento a priori secondo il quale la vita dovrebbe esistere non solo sulla Terra ma anche altrove nella nostra Galassia mi sembra convincente. Come ho già osservato, nella Galassia ci sono circa 400 miliardi di stelle. Sarebbe davvero strano se il nostro Sole fosse l'unica stella attorno alla quale si sono evoluti esseri intelligenti. Si può cercare di calcolare con maggiore precisione, attraverso una serie di stime combinate, la probabilità che forme di vita simili a noi esistano anche altrove. Si comincia da domande ovvie, come: «Qual è la probabilità che la maggior parte delle stelle abbiano pianeti?» o «Qual è la probabilità che una determinata stella abbia un'esistenza abbastanza lunga da sostenere la vita nel suo sistema planetario?», passando poi a domande planetarie, come «Questo pianeta è abbastanza grande da poter avere un'atmosfera?» o «Qual è la probabilità che esso abbia avuto in passato un'attività vulcanica sufficiente a produrre abbastanza acqua alla sua superficie?» o «Qual è la probabilità che esso abbia un satellite di massa abbastanza grande o a distanza abbastanza piccola da causare maree sufficienti a produrre pozze di marea nelle quali potrebbe avere avuto origine la vita, ma non onde di marea quotidiane?» Anche se cercherò di esaminare alcuni di questi interrogativi, il problema, in ogni tentativo di determinare probabilità realistiche, consiste, innanzitutto, nel fatto che molti dei parametri in gioco sono indeterminati e, in secondo luogo, che non sappiamo in che modo tutti i parametri siano correlati. È piuttosto difficile determinare con precisione la probabilità di eventi quotidiani. Quando una stima si fonda su una sequenza di probabilità molto piccole, i risultati ottenuti sono spesso assai incerti.

Si dovrebbe ricordare anche che a volte l'interpretazione di una probabilità ben definita può essere molto sottile. Per esempio, la probabilità di una qualsiasi sequenza specifica di eventi – come il fatto che io stia seduto su questo specifico tipo di sedia a battere sulla tastiera di questo specifico computer (fra tutti i milioni di computer che vengono prodotti ogni anno), in questo specifico luogo (fra tutte le città possibili del mondo), in questa specifica ora del giorno (fra gli 86.400 secondi al giorno) – è infinitesima. La stessa cosa si può dire per qualsiasi altro insieme di circostanze nella mia vita. Similmente, nel mondo inanimato, è altrettanto evanescente la probabilità che, diciamo, un nucleo radioattivo decada nel momento esatto in cui decade. Tuttavia noi non calcoliamo tali probabilità ma ci domandiamo, piuttosto, quanto sia probabile che il nucleo decada in un qualche intervallo di tempo non nullo, o quanto più probabile sia un decadimento in un tempo piuttosto che in un altro tempo.

Se tentiamo di stimare le probabilità della vita nella Galassia, dobbiamo stare molto attenti a non limitare eccessivamente la sequenza degli eventi considerati. Se si è abbastanza rigorosi, come in generale avviene, si tende a concludere che la probabilità dell'origine della vita sulla Terra in quella determinata epoca era infinitesima, probabilità che viene a volte usata come argomento a favore di un intervento divino. Come ho però appena indicato, si potrebbe assegnare lo stesso valore infinitesimo alla probabilità che il semaforo che vedo dal finestrino della mia auto passi dal giallo al rosso mentre io sarò in attesa di poter passare davanti al semaforo stesso alle 11,57 del 3 giugno 2010. Ciò non significa però che una cosa del genere non possa accadere.

Il fatto importante da riconoscere è che *la vita ebbe origine* nella Galassia almeno una volta. Non potrei mai sottolineare abbastanza l'importanza di questo fatto. Fondandoci su tutta la nostra esperienza scientifica, possiamo dire che raramente la natura produce un fenomeno una volta sola. La nostra stessa esistenza crea, per così dire, un precedente per casi analoghi. Il fatto che noi esistiamo dimostra che la formazione della vita è possibile. Una volta che sappiamo che la vita può avere origine qui nella Galassia, aumenta di molto la probabilità che essa possa esistere anche altrove. (Ovviamente, come hanno sostenuto alcuni biologi evoluzionisti, non è detto che essa sviluppi necessariamente un'intelligenza.)

Benché la nostra immaginazione sia certamente troppo debole per poter considerare tutte le combinazioni di condizioni in grado di dare origine a forme di vita intelligenti, noi possiamo usare la nostra esistenza per domandarci quali proprietà dell'universo siano state essenziali o importanti nella nostra evoluzione.

Possiamo prendere l'avvio dall'universo nella sua totalità. Ho già menzionato una coincidenza cosmica: che nei primissimi tempi dell'universo c'era un protone extra ogni 10 miliardi circa di protoni e di antiprotoni. Senza questi protoni extra, la materia si sarebbe annichilata completamente con l'antimateria, e oggi nell'universo non ci sarebbe più materia, intelligente o no.

Un altro carattere ovvio dell'universo in cui viviamo è che esso è vecchio, molto vecchio. La vita intelligente ha impiegato circa 4,5 miliardi di anni a svilupparsi sulla Terra. La nostra stessa esistenza dipende perciò da un universo che ha reso possibile l'evoluzione che ha condotto fino a noi grazie a una durata di miliardi di anni. La stima migliore attualmente disponibile dell'età del nostro universo è di circa 14 miliardi di anni, che è un tempo molto lungo. Un universo come il nostro capace di espandersi con regolarità, senza ricollassare molto rapidamente in un'inversione del big bang – un *big crunch* – o senza espandersi così velocemente da non lasciare alla materia il tempo di aggregarsi in stelle o galassie, richiedeva condizioni iniziali molto precise. Tali condizioni, o un qualche processo fisico dinamico capace di creare molto presto nella storia dell'universo condizioni del genere, devono essere stati sintonizzati con grandissima precisione per creare una situazione favorevole all'evoluzione che ha condotto fino a noi.

Questo è il cosiddetto problema della «piattezza», la cui comprensione è diventata oggi uno dei problemi centrali della cosmologia. L'attrazione gravitazionale dovuta alla presenza di materia tende a rallentare l'espansione dell'universo. Rimangono di conseguenza due possibilità: o nell'universo c'è abbastanza materia da determinare a un certo punto l'arresto e l'inversione della sua espansione (in questo caso l'universo è «chiuso»), oppure non c'è materia a sufficienza e l'universo si espanderà per sempre (universo «aperto»).

Quel che sorprende nell'attuale universo è il fatto che, se sommiamo tutte le forme di materia di cui ipotizziamo l'esistenza, la quantità che troviamo è stranamente vicina alla linea di confine fra queste due possibilità: questa situazione corrisponderebbe a quella di un universo «piatto», in cui l'espansione osservata rallenterebbe di continuo senza mai aver fine in alcuna quantità di tempo finita.

Ma ancora più sorprendente è il fatto che, se l'universo non è esattamente piatto, si discosterà sempre più da questa condizione con il passare del tempo. Poiché esso esiste probabilmente da almeno 10 miliardi di anni, e poiché, come suggeriscono le osservazioni, dev'essere oggi molto vicino alla curvatura zero, dev'essere stato ancora più piatto in tempi molto anteriori. È difficile immaginare come una cosa del genere possa verificarsi per caso, senza che ci sia un qualche preciso processo fisico a determinare una situazione così esattamente in equilibrio fra un universo aperto e un universo chiuso. Un quarto di secolo fa fu escogitato un processo fisico in grado di spiegare come si sia determinata questa situazione. Noto come «inflazione», è un processo onnipresente che potrebbe essersi verificato in conseguenza di effetti meccanici quantistici all'inizio dell'universo.

Ricordiamo che lo spazio vuoto non è davvero vuoto ma che fluttuazioni quantiche nel vuoto possono trasportare energia. Poiché nell'universo iniziale la natura delle forze agenti fra particelle elementari si evolse con la temperatura, l'energia immagazzinata sotto forma di fluttuazioni quantiche nello spazio vuoto potrebbe essere la forma di energia dominante nell'universo. Questa energia del vuoto potrebbe esercitare una repulsione gravitazionale, invece che un'attrazione. Si fa l'ipotesi che l'universo sia passato per una breve fase inflativa dominata da tale energia del vuoto, la quale potrebbe aver dato origine a una rapidissima espansione. Si può mostrare che, al termine di un tale periodo d'inflazione, una volta compiuto il trasferimento dell'energia del vuoto nell'energia della materia e della radiazione, l'universo può facilmente diventare piatto con una precisione molto elevata.

Rimane però un altro problema, forse più grave. Einstein lo affrontò per la prima volta quando tentò di applicare all'universo la sua nuova teoria della relatività generale. A quel tempo non si conosceva ancora l'espansione dell'universo, ma si credeva che esso fosse statico e immutabile su grandi scale. Einstein dovette perciò escogitare qualcosa per spiegare come mai tutta questa materia non collassasse su se stessa in conseguenza della sua attrazione gravitazionale. Egli introdusse nelle sue equazioni un termine – la cosiddetta costante cosmologica – che introduceva essenzialmente una repulsione

cosmica per controbilanciare l’attrazione gravitazionale della materia su grandi scale. Una volta riconosciuto che l’universo non è statico, Einstein si rese conto che non c’era alcun bisogno di un tale termine, la cui introduzione fu da lui definita «l’errore più grave» da lui mai commesso.

Purtroppo, però, come quando si tenta di far rientrare il dentifricio nel tubetto, una volta che si sia considerata la possibilità di una costante cosmologica non si può più tornare indietro. Ma se fu possibile l’introduzione di una costante cosmologica nelle equazioni di Einstein, dobbiamo spiegare perché essa non corrisponda a qualcosa di reale nell’universo osservato. In realtà l’energia del vuoto che ho descritto sopra produce esattamente lo stesso effetto che Einstein cercò di spiegare con la costante cosmologica. La domanda diventa allora: come mai una tale energia del vuoto non è dominante nell’universo attuale? o, come mai l’universo non è ancora in inflazione?

Questa era una delle domande più profonde che non avevano ancora trovato risposta in fisica. Ogni calcolo che facciamo con le teorie attualmente a nostra disposizione suggerisce che l’energia del vuoto dovrebbe essere oggi di molti ordini di grandezza maggiore di quanto non consentano le nostre osservazioni. A confondere ancora un po’ di più la situazione, come menzionai nella prima edizione di questo libro, si cominciava ad avere l’impressione che l’energia dello spazio vuoto, pur non essendo grandissima, non fosse tuttavia nulla, ma ancora abbastanza grande da incidere sull’evoluzione presente e futura dell’universo. Attorno a quell’epoca, analizzando i dati cosmologici allora disponibili, fra cui l’età dell’universo, la densità della materia e stime sulle strutture a grande scala, proposi insieme a un collega di Chicago[16] che i dati sarebbero stati coerenti con un universo piatto solo se almeno il 70 per cento dell’energia dell’universo fosse stata energia dello spazio vuoto, non associata a galassie e ammassi. Quest’ipotesi eretica fu sorprendentemente confermata nel 1998 da osservazioni della rapidità di espansione dell’universo. Ricorderete che l’energia del vuoto, come una costante cosmologica, produce una forza repulsiva. Misurando un tipo specifico di esplosione stellare o supernova in galassie remote per determinare la distanza di questi oggetti, e misurando al tempo stesso la velocità di recessione di quelle galassie, gli osservatori scoprirono, con grande sorpresa, che l’espansione dell’universo va accelerando, anziché rallentando, nel corso del tempo. Questa è una scoperta del tutto antiintuitiva, in un universo in cui la gravità esercita normalmente un’attrazione e dovrebbe rallentare qualsiasi espansione. Tuttavia l’accelerazione osservata potrebbe spiegarsi nell’ipotesi che il 70 per cento dell’energia totale dell’universo risiedesse nello spazio vuoto e il 30 per cento nella materia.

Al tempo stesso misurazioni indipendenti della curvatura dello spazio a grandi scale dimostrarono con margini di incertezza minimi che l’universo è piatto, come ci si attendeva teoricamente. Frattanto, determinazioni totali della massa dell’universo associata a galassie e ammassi hanno ora definitivamente dimostrato che in questi sistemi è presente solo il 30 per cento circa della massa totale richiesta per produrre un universo piatto. Queste due osservazioni potrebbero essere coerenti fra loro solo nell’ipotesi che il 70 per cento dell’energia totale dell’universo esista in qualche altra forma. Oggi tutto indica che l’energia dominante nell’universo esiste nella forma di qualcosa che sembra davvero molto simile a una costante cosmologica!

Mentre la piattezza quasi assoluta dell’universo potrebbe essere stata necessaria perché infine si formasse la vita sulla Terra e altrove, il valore inferito della costante cosmologica suggerisce la possibilità ancora migliore di una regolazione precisa del problema. All’inizio ci si attendeva che qualche trucco teorico spiegasse perché oggi la costante cosmologica debba essere zero. Ma oggi a quanto pare l’energia dello spazio vuoto non è zero. Perché dunque è così piccola? Cosa interessante, si può dimostrare che, se l’energia del vuoto fosse magari anche solo di uno o due ordini di grandezza maggiore, non si sarebbero mai formate galassie nell’universo primitivo: la forza di repulsione introdotta da quest’«energia oscura» nello spazio vuoto avrebbe più che compensato l’attrazione gravitazionale fra le masse di materia pregalattiche, rendendo loro impossibile aggregarsi. *Se* non ci fossero state galassie non ci sarebbero state stelle o pianeti, né alieni e nemmeno autori di *Star Trek.*

Un universo senza autori di *Star Trek* potrebbe essere troppo orribile per immaginarlo; eppure gli scienziati sono riusciti a immaginare anche la possibilità di mondi senza vita. In effetti, anche a un livello microfisico fondamentale ci sono una quantità di coincidenze cosmiche che hanno permesso alla vita di formarsi sulla Terra. Se una qualsiasi di un numero di quantità fisiche fondamentali in natura fosse leggermente diversa, non sarebbero esistite le condizioni essenziali per l’evoluzione della vita sulla Terra. Per esempio, se si cambiasse solo di un fattore 2 la piccolissima differenza di massa fra un neutrone e un protone (che è di circa 1/1000), l’abbondanza degli elementi nell’universo, alcuni dei quali sono essenziali per la vita sulla Terra, sarebbe radicalmente diversa da quella che osserviamo oggi. Analogamente, se il livello di energia di uno degli stati eccitati del nucleo dell’atomo di carbonio fosse leggermente diverso, non si verificherebbero le reazioni che producono carbonio nell’interno delle stelle, e oggi nell’universo non esisterebbe il carbonio: l’elemento che è alla base delle molecole organiche.

Ovviamente è difficile sapere fino a che punto si debba insistere su queste coincidenze. Non sorprende – visto che noi *ci siamo evoluti* in questo universo – trovare che le costanti naturali abbiano esattamente i valori necessari per creare le

condizioni indispensabili alla nostra evoluzione. Si potrebbe immaginare che il nostro universo osservato faccia parte di un metauniverso, esistente a una scala molto maggiore di quella che noi possiamo osservare. In ognuno degli universi che compongono questo metauniverso, le costanti di natura potrebbero essere diverse. Negli universi che hanno costanti incompatibili con l'evoluzione della vita non ci sarà nessuno a misurare niente. Per parafrasare il ragionamento del cosmologo russo Andrej Linde, che accetta questa forma del cosiddetto «principio antropico», è come se un pesce intelligente si chiedesse perché l'universo in cui vive (l'interno di una vasca d'acquario) è fatto d'acqua. La risposta è semplice: se non fosse fatto d'acqua, il pesce non sarebbe lì a porsi tale domanda.

Risulta inoltre che ci sono varie ipotesi teoriche secondo le quali il nostro universo potrebbe essere effettivamente parte di un multiverso. Per esempio l'inflazione, con la sua fase iniziale di rapida espansione, suggerisce che il nostro universo osservabile potrebbe essere solo una piccola parte di un tutto molto più grande. Se l'inflazione dovesse terminare in modi diversi in parti differenti di questa regione, la vita si formerebbe solo in quelle parti in cui le leggi della fisica fossero appropriate.

Più recentemente è stata proposta un'altra possibilità teorica ancora più esotica. La teoria delle stringhe, di cui mi occuperò più diffusamente fra breve, presuppone una quantità di nuove dimensioni finora non scoperte e, con queste, numerose nuove possibilità di universi quadridimensionali. Fra le molte carenze di questa teoria è risultato però che, anche se fosse vera, non sarebbe a quanto pare in grado di predire perché il nostro universo ci appare così come ci appare. I sostenitori del principio antropico hanno additato questo difetto come un vantaggio. Oggi i teorici delle stringhe parlano di un «paesaggio» cosmico delle stringhe, con potenzialmente 10^{500} universi quadridimensionali diversi possibili, ognuno dei quali potrebbe avere leggi della fisica diverse, e hanno sostenuto che il nostro universo potrebbe apparire come appare non per motivi fondamentali ma per ragioni antropiche.

Voglio sottolineare che, se queste idee fossero effettivamente vere, la fisica del nostro universo non sarebbe dovuta a nulla di veramente fondamentale, bensì semplicemente a un caso accidentale ambientale, associato al semplice dato di fatto che noi ci troviamo semplicemente a vivere in esso. Perciò molti fisici, che divennero fisici proprio perché erano motivati a scoprire le leggi fondamentali che governano l'universo, non sono galvanizzati da questa possibilità.

Poiché la maggior parte di questi problemi, per quanto interessanti, non sono oggi risolvibili empiricamente, è forse meglio lasciarli ai filosofi, ai teologi e magari anche agli scrittori di fantascienza. Accettiamo il fatto che l'universo *è riuscito* a evolversi, sia al livello microscopico sia a quello macroscopico, in un modo che ha permesso l'evoluzione della vita. Passeremo ora a considerare la nostra patria, la Galassia della Via Lattea.

Quando consideriamo quali sistemi nella nostra Galassia possano ospitare forme di vita intelligente, dobbiamo affrontare problemi fisici molto meglio definiti. Poiché nella Galassia ci sono stelle che, sulla base di tutte le stime, avrebbero un'età di almeno 10 miliardi di anni mentre la vita sulla Terra non ha più di 3,5 miliardi di anni, siamo indotti a domandarci da quanto tempo potrebbe essere esistita la vita nella Galassia prima di avere avuto origine sulla Terra.

Quando il sistema della Via Lattea cominciò a condensarsi, da 10 a 20 miliardi di anni fa, le stelle della sua prima generazione erano composte completamente da idrogeno ed elio, gli unici elementi creati con un'abbondanza significativa durante il big bang. La fusione nucleare all'interno di queste stelle continuò a convertire l'idrogeno in elio e, una volta esaurito l'idrogeno, cominciò a «bruciare» elio per dare origine a elementi ancora più pesanti. Queste reazioni di fusione continuano ad alimentare una stella fino a quando il suo nucleo non si trova a essere composto primariamente di ferro. Il ferro non può essere usato nella fusione per formare elementi più pesanti, e quindi a questo punto il combustibile nucleare di una stella è esaurito. La rapidità con cui una stella brucia il suo combustibile nucleare dipende dalla sua massa. Il nostro Sole, dopo 5 miliardi di anni di consumo di idrogeno, non è neppure a metà della prima fase della sua evoluzione stellare. Una stella di 10 masse solari – cioè di massa 10 volte maggiore di quella del Sole – brucia il suo combustibile con una rapidità 1000 volte più elevata. Queste stelle consumeranno il loro idrogeno in meno di 100 milioni di anni, anziché nei 10 miliardi di anni della vita del Sole.

Che cosa accade a una di queste stelle di grande massa quando esaurisce il suo combustibile nucleare? Non passano pochi secondi dopo la combustione degli ultimi residui che le parti più esterne delle stella sono espulse violentemente verso l'esterno in un'esplosione che la trasforma in una supernova, uno dei più splendenti fuochi d'artificio che illuminino le buie estensioni dell'universo. Le supernove brillano per breve tempo con lo splendore di un miliardo di stelle. Attualmente si osservano nella Galassia due o tre esplosioni di supernove ogni cento anni. Quasi mille anni fa gli astronomi cinesi osservarono una nuova stella visibile in cielo di giorno, che chiamarono una «stella ospite». Quella supernova ha lasciato come proprio residuo, da noi oggi osservabile al telescopio, la Nebulosa del Granchio, nella costellazione del Toro. È interessante il fatto che quest'oggetto più o meno effimero non sia stato registrato in nessuna cronaca dell'Europa

Occidentale. A quel tempo era un dogma che il cielo fosse eterno e immutabile, ed era quindi molto meglio non vedere se non si voleva rischiare la morte sul rogo. Mezzo secolo dopo gli astronomi europei si erano sufficientemente affrancati da questo dogma perché l'astronomo danese Tycho Brahe potesse registrare la successiva supernova osservabile a occhio nudo nella Galassia.

Molti fra gli elementi pesanti prodotti nei processi di fusione nella parte tranquilla della vita di una supernova, e altri creati durante l'esplosione stessa, vengono dispersi nel mezzo interstellare, e una parte di questa «polvere di stelle» viene compresa nel gas interstellare che collassa poi a formare un'altra stella in qualche altra regione del cielo. Nel corso di miliardi di anni si formano successive generazioni di stelle – come le stelle della cosiddetta Popolazione 1, alla quale appartiene il nostro Sole –, molte delle quali possono essere circondate da un disco rotante di gas e polvere, dalla cui progressiva aggregazione prendono forma pianeti, contenenti elementi pesanti come calcio, carbonio e ferro. Di questa materia siamo fatti noi stessi. Ogni atomo presente nel nostro corpo fu creato miliardi di anni fa, nella fornace fiammeggiante di qualche stella morta da molto tempo. Io trovo che questo sia uno dei fatti più affascinanti e poetici dell'universo e ho scritto su di esso un intero libro, intitolato *Il mondo in un atomo* (Longanesi, 2003). Noi tutti siamo letteralmente figli delle stelle.

Ora, non sarebbe di alcuna utilità ai fini dell'evoluzione della vita se un pianeta come la Terra si formasse in prossimità di una stella di grande massa. Come abbiamo visto, tali stelle si evolvono e muoiono nel corso di un centinaio di milioni di anni. Soltanto stelle di massa uguale o inferiore a quella del Sole rimarranno più di 5 miliardi di anni in una fase stabile della combustione dell'idrogeno. È difficile immaginare come potrebbe formarsi la vita su un pianeta in orbita attorno a una stella che presentasse grandissime variazioni di splendore nel corso di tale evoluzione. Inversamente, se una stella più piccola e meno luminosa del nostro Sole avesse un sistema planetario, un pianeta abbastanza caldo da poter sostenere la vita sarebbe probabilmente così vicino alla stella da essere distrutto da forze di marea. Perciò, se dobbiamo andare alla ricerca della vita, è meglio cercare stelle non molto diverse dalla nostra. Per fortuna il Sole è un membro piuttosto comune della Galassia. Circa il 25 per cento di tutte le stelle del nostro sistema stellare – ossia circa 100 miliardi – rientrano nel giusto ambito. La maggior parte di esse sono ancora più vecchie del Sole e potrebbero perciò avere fornito sedi per lo sviluppo della vita anche già 4-5 miliardi di anni prima del Sole.

Torniamo sulla Terra. Che cos'è che rende così speciale il nostro bel pianeta verde-azzurro? In primo luogo, esso si trova nella parte interna del sistema solare. Questo fatto è importante, perché i pianeti esterni hanno una percentuale di idrogeno ed elio molto più elevata, molto più simile a quella del Sole. Pare che la maggior parte degli elementi «pesanti presenti nel disco di gas e polvere che circondava il Sole alla sua nascita sia rimasta nella parte interna del sistema. Ci si potrebbe attendere perciò che sedi potenziali per l'evoluzione della vita si trovino a una distanza dalla loro stella (di massa solare pari a 1) inferiore a quella di Marte dal nostro Sole.

Inoltre la Terra, come avrebbe potuto dire Riccioli d'Oro, è un pianeta perfetto per lo sviluppo della vita: non troppo grande né troppo piccolo, non troppo caldo né troppo freddo. Poiché i pianeti interni non avevano probabilmente atmosfera quando si formarono, questa dovette essere generata dai gas prodotti da vulcani. Anche l'acqua sulla superficie terrestre fu prodotta in questo modo. Un pianeta più piccolo della Terra avrebbe forse irraggiato il calore interno dalla sua superficie in modo abbastanza rapido da prevenire un'intensa attività vulcanica. Così è stato presumibilmente nel caso di Mercurio e della Luna. Marte è un caso di confine, mentre la Terra e Venere hanno sviluppato un'atmosfera consistente. Recenti misurazioni di isotopi gassosi radioattivi nelle rocce terrestri suggeriscono che, dopo un periodo di bombardamento iniziale durato da 100 a 150 milioni di anni – circa 4,5 miliardi di anni fa – nel corso del quale la Terra si formò per aggregazione di materiale caduto su di essa, il vulcanismo produsse in alcuni milioni di anni l'85 per cento dell'atmosfera. Così, di nuovo, non sorprende che la vita organica si sia formata sulla Terra piuttosto che su altri pianeti del sistema solare, e ci si potrebbe attendere di vedere riconfermata la stessa tendenza altrove nella Galassia: sui pianeti della Classe M, come sono chiamati nell'universo di *Star Trek.*

La domanda successiva è quanto tempo potrebbe richiedere l'evoluzione della vita, seguita da quella della vita intelligente, sulla base della nostra esperienza sulla Terra. La risposta alla prima parte della domanda è che la vita potrebbe avere cominciato a evolversi molto presto. Sono stati scoperti relitti fossili di alghe azzurre risalenti a circa 3,5 miliardi di anni fa, e vari ricercatori hanno sostenuto che la vita stava già fiorendo 4 miliardi di anni fa. La vita sulla Terra ebbe origine quindi entro un centinaio di milioni di anni a partire dal tempo in cui si presentarono le condizioni che la resero possibile. Questo è un dato molto incoraggiante.

Ovviamente, dal tempo in cui ebbe inizio la vita sulla Terra fino all'evoluzione di strutture pluricellulari complesse, e poi della vita intelligente, potrebbero essere trascorsi quasi 3 miliardi di anni. Abbiamo ogni ragione di credere che questo tempo sia stato governato più dalla fisica che dalla biologia. Inizialmente l'atmosfera originaria della Terra non conteneva ossigeno.

Erano presenti anidride carbonica, azoto e tracce di metano, ammoniaca, anidride solforosa e acido cloridrico, ma niente ossigeno. Questo gas non solo è essenziale per le forme avanzate di vita organica sulla Terra, ma svolge un altro ruolo importante. Solo quando nell'atmosfera c'è una quantità sufficiente di ossigeno può formarsi ozono. Questa forma allotropica dell'ossigeno, con molecole formate da tre atomi anziché da due, è essenziale alla vita della Terra come stiamo rendendoci sempre più conto, in quanto arresta la radiazione ultravioletta, che è dannosa per la maggior parte degli organismi. Non sorprende perciò che la rapida esplosione della vita sulla Terra abbia avuto inizio solo dopo che l'ossigeno divenne abbondante.

Misurazioni recenti indicano che l'ossigeno cominciò ad accumularsi nell'atmosfera circa 2 miliardi di anni fa, e che raggiunse i livelli attuali in capo a 600 milioni di anni. Benché la produzione di ossigeno fosse iniziata già prima di quest'epoca, per fotosintesi da parte delle alghe azzurre degli oceani primordiali, esso non aveva potuto accumularsi inizialmente nell'atmosfera. Questo gas reagisce infatti con un numero tanto grande di sostanze, fra cui per esempio il ferro, che l'intera quantità prodotta per fotosintesi si combinò con altri elementi prima di poter raggiungere l'atmosfera. Infine nell'oceano si ossidarono abbastanza materiali da permettere infine l'esistenza di ossigeno libero, che potè infine cominciare ad accumularsi nell'atmosfera. (Questo processo non si verificò mai su Venere in quanto la temperatura era troppo elevata perché potessero formarvisi oceani, e quindi non vi ebbero mai origine organismi come le alghe azzurre, che formano e preservano la vita.)

Dopo che le condizioni furono realmente mature per lo sviluppo di forme di vita complesse, occorse quindi un miliardo di anni circa perché potesse cominciare la loro evoluzione. Ovviamente non è affatto detto che questa debba essere una scala di tempo tipica. Eventi accidentali come direzioni sbagliate prese dall'evoluzione, mutamenti di clima ed eventi catastrofici che produssero estinzioni incisero sia sulla scala biocronologica sia sui risultati finali.

Questi risultati indicano tuttavia che la vita intelligente può evolversi in un lasso di tempo piuttosto breve alla scala di tempo cosmica: un miliardo di anni circa. L'estensione di questa scala temporale ha a che fare con fattori puramente fisici, come la produzione di calore e i ritmi delle reazioni chimiche. La nostra esperienza terrestre ci suggerisce che, anche se limitiamo le nostre attese della vita intelligente a organismi aerobici e anaerobici – un assunto senza dubbio molto prudente, e che gli autori di *Star Trek* furono disposti ad abbandonare (il personaggio Horta, a base di silicio, è uno dei miei preferiti) –, i pianeti che orbitano attorno alle stelle di massa solare di qualche miliardo di anni d'età sono buoni candidati come sedi di vita intelligente.

Ammettendo che la formazione di vita organica sia un processo robusto e relativamente rapido, quali prove abbiamo che i suoi ingredienti fondamentali – ossia molecole organiche e altri pianeti oltre al nostro – esistano anche altrove nell'universo? Anche a questo proposito risultati recenti consentono un sostanziale ottimismo. Sono state osservate molecole organiche in asteroidi, comete, meteoriti nonché nello spazio interstellare. Alcune di queste sono molecole complesse, comprendenti amminoacidi, i mattoni della vita. Misurazioni del gas e di granuli di polvere interstellari eseguite nelle microonde hanno condotto all'identificazione di decine di composti organici, alcuni dei quali si presume siano idrocarburi complessi. Ci sono pochi dubbi sul fatto che la materia organica è probabilmente diffusa in tutta la Galassia.

Infine, che cosa si può dire sui pianeti? Benché fino a oggi sia stata eseguita solo un'osservazione diretta di un sistema planetario diverso dal nostro, da molto tempo si crede che la maggior parte delle stelle sia circondata da pianeti. Senza dubbio una buona percentuale delle stelle osservate ha una compagna, e forma sistemi binari. Si osserva, inoltre, che molte stelle giovani hanno un disco circumstellare di polvere e gas, che rappresenta presumibilmente una fase antecedente alla formazione dei pianeti. Vari modelli numerici per la previsione della distribuzione delle masse e delle orbite planetarie in quei dischi suggeriscono (e vorrei qui sottolineare la parola «suggeriscono») che essi produrranno in media almeno un pianeta simile alla Terra a una distanza dalla stella centrale simile a quella della Terra. Più recentemente, un altro sistema planetario è stato infine scoperto direttamente a 1400 anni-luce dalla Terra. Cosa un po' sorprendente, il sistema osservato è uno dei luoghi meno ospitali che si possano immaginare per dei pianeti: tre pianeti tutti in orbita attorno a una pulsar – il nucleo collassato di una supernova –, a una distanza dalla stella inferiore a quella di Venere dal Sole. Questi pianeti potrebbero essersi formati dopo l'esplosione della supernova, e non prima; in ogni caso questa scoperta indica che la formazione di pianeti non è probabilmente un fenomeno raro.

Non vorrei comunque perdere di vista la foresta per osservare in modo troppo analitico gli alberi. È quasi miracoloso che le normali leggi della fisica e della chimica, combinate con un universo in espansione dell'età di più di 10 miliardi di anni, abbiano condotto all'evoluzione di menti coscienti in grado di studiare l'universo da cui hanno avuto origine. Ma benché le circostanze che hanno condotto all'origine e all'evoluzione della vita sulla Terra siano speciali, pare che esse non siano affatto peculiari della Terra. Gli argomenti che ho menzionato sopra ci inducono a credere che nella nostra Galassia potrebbero facilmente esserci più di un miliardo di sedi possibili per la vita organica. E poiché la nostra Galassia è solo una

delle 400 miliardi di galassie esistenti nell'universo osservabile, mi è difficile credere che noi siamo soli. Inoltre, molte stelle della Popolazione 1 si sono formate prima del nostro Sole, in qualche caso fino a 5 miliardi di anni prima. Data la cornice temporale di cui ci siamo occupati sopra, è probabile che la vita intelligente si sia evoluta in molti luoghi miliardi di anni prima dell'origine del nostro Sole. Potremmo in effetti attenderci che la maggior parte delle forme di vita intelligente nella nostra Galassia si siano evolute prima di noi. Così, se le civiltà intelligenti hanno una durata abbastanza lunga, la Galassia potrebbe essere popolata da civiltà esistenti letteralmente da miliardi di anni. D'altra parte, se consideriamo la nostra storia, possiamo pensare che tali civiltà abbiano dovuto affrontare i rischi di guerre e carestie, e che potrebbero non essere esistite più di qualche migliaio di anni; in questo caso la maggior parte della vita intelligente nell'universo sarebbe scomparsa da molto tempo. Come si espresse efficacemente un ricercatore più di vent'anni fa: «Il problema se nell'universo esista vita intelligente dipende, in ultima analisi, da quanto intelligente sia tale vita»[17].

Che cosa accadrà dunque? Saremo noi a mandare per primi le nostre astronavi per esplorare strani nuovi mondi e arrivare là dove nessuno è mai giunto prima? O saremo invece scoperti dai nostri vicini galattici, che potrebbero essersi sintonizzati sulle varie serie di *Star Trek* mentre questi segnali si muovevano alla velocità della luce attraverso la Galassia? Io penso che le cose non andranno né nel primo né nel secondo modo, e sono in buona compagnia.

In primo luogo, abbiamo visto chiaramente quali siano le spaventose difficoltà del volo interstellare. I viaggi negli spazi cosmici richiedono un dispendio di energia infinitamente superiore alle nostre disponibilità attuali, quand'anche disponessimo di motori di curvatura. Ricordiamo che, per un viaggio di andata e ritorno di 10 anni alla stella più vicina, a una velocità prossima a 3/4 della velocità della luce, usando per la propulsione un razzo con motori a materia-antimateria, si richiederebbe un consumo di energia tale da soddisfare i bisogni energetici attuali degli Stati Uniti per più di 100.000 anni! Quest'energia è a sua volta insignificante rispetto a quella che si richiederebbe per operare sulla curvatura dello spazio. Inoltre, per avere una buona probabilità di trovare la vita, si dovrebbe visitare almeno un campione di vàrie migliaia di stelle. Temo che, anche alla velocità della luce, questa impresa non potrà essere realizzata nel prossimo millennio.

Questa è la cattiva notizia. La buona notizia è che per gli stessi motivi non dovremo probabilmente preoccuparci troppo del pericolo di essere rapiti da alieni. Anch'essi dovrebbero aver fatto i calcoli dell'energia necessaria e avere scoperto che è più facile imparare qualcosa su di noi da lontano.

Dobbiamo dunque dedicare le nostre energie a far conoscere la nostra esistenza trasmettendo via radio? Sarebbe certamente un sistema molto più economico. Potremmo trasmettere al sistema stellare più vicino un messaggio di 10 parole, che potrebbe essere ricevuto da antenne radio di grandezza ragionevole, spendendo meno di un dollaro di elettricità. Se però – e anche qui riprendo un argomento del premio Nobel Edward Purcell – trasmettiamo invece di ascoltare, rischiamo di lasciarci sfuggire la maggior parte delle forme di vita intelligenti. Le civiltà molto in anticipo rispetto a noi potrebbero ovviamente operare molto meglio di noi nella trasmissione di segnali potenti. E poiché noi siamo attivi nel campo delle radiotrasmissioni da soli 80 anni circa, sono presumibilmente pochissime le società meno avanzate di noi che potrebbero avere la tecnologia occorrente per ricevere i nostri segnali. Così, come soleva dire mia madre, dovremmo ascoltare prima di parlare. Benché io scriva questo, improvvisamente spero che tutte quelle società più avanzate non la pensino esattamente nello stesso modo.

Ma che cosa dobbiamo ascoltare? Se non abbiamo già un'idea del canale su cui ascoltare, la situazione sembrerebbe disperata. In questo caso possiamo farci guidare da *Star Trek.* Nell'episodio *Il figlio della Galassia,* della serie *The Next Generation,* l'*Enterprise* si imbatte in un organismo alieno che vive nello spazio vuoto, nutrendosi di energia. Esso apprezza particolarmente una radiazione con una frequenza molto specifica, di 1420 milioni di cicli al secondo, corrispondente a una lunghezza d'onda di 21 cm.

Nello spirito di Pitagora, se ci fosse una musica delle sfere, questa sarebbe senza dubbio la nota di apertura. Millequattrocentoventi megahertz è la frequenza naturale della precessione dello spin di un elettrone mentre orbita attorno al nucleo dell'idrogeno, la sostanza più abbondante nell'universo. Questa è la frequenza radio più diffusa, per un fattore di almeno 1000, nella Galassia. Essa cade inoltre precisamente nella finestra di frequenze che, come la luce visibile, possono essere trasmesse e ricevute attraverso un'atmosfera capace di sostenere la vita organica. A questa frequenza, infine, c'è ben poco rumore di fondo. I radioastronomi se ne sono serviti per determinare la distribuzione dell'idrogeno nella Galassia – che è ovviamente sinonimo di distribuzione della materia – e hanno in tal modo determinato la forma della Galassia stessa. Ogni specie abbastanza intelligente da sapere qualcosa delle onde radio e dell'universo conosce sicuramente questa frequenza. Essa è il faro universale. Trentasei anni fa, gli astrofisici Giuseppe Cocconi e Philip Morrison suggerirono che questa sia la frequenza naturale su cui si dovrebbe trasmettere o ricevere, e nessuno ha discusso da allora questa conclusione.

Hollywood non solo ha congetturato quale sia la giusta frequenza su cui si deve ascoltare, ma ha anche aiutato a raccogliere fondi per organizzare l'ascolto. Benché programmi di ascolto su piccola scala siano stati condotti da più di 30 anni, il primo programma su vasta scala fu lanciato nell'autunno del 1985, quando Steven Spielberg tirò una grande leva di rame che diede formalmente inizio al Progetto META (Megachannel Extra Terrestrial Array). Il progetto, concepito dal mago dell'elettronica Paul Horowitz, dell'università di Harvard, è condotto per mezzo del radiotelescopio di 26 metri dello Harvard/Smithsonian Center for Astrophysics, a Cambridge, Massachusetts, e finanziato privatamente dalla Planetary Society, compreso un contributo di 100.000 dollari dello stesso signor ET. Il META usa una schiera di 128 processori paralleli per analizzare simultaneamente 8.388.608 canali di frequenza nella gamma di 1420 megahertz e della sua cosiddetta seconda armonica, a 2840 megahertz. Si sono raccolti dati per più di cinque anni, e il META ha coperto tre volte il cielo alla ricerca di un segnale extraterrestre.

Ovviamente si deve ascoltare con intelligenza. Innanzitutto si deve riconoscere che, anche se un segnale è trasmesso a 1420 megahertz, potrebbe non essere ricevuto a questa frequenza, a causa del famoso effetto Doppler (per cui il fischio di un treno in avvicinamento si sente su un tono più alto di quando il treno si allontana da noi). Lo stesso vale per qualsiasi radiazione emessa da una sorgente in movimento. Poiché la maggior parte delle stelle nella Galassia si muovono alla velocità di varie centinaia di km al secondo relativamente a noi, tale effetto non dev'essere ignorato. (Gli autori di *Star Trek* non lo hanno ignorato; essi hanno aggiunto «compensatori Doppler» al teletrasporto per tener conto del moto relativo della nave spaziale e del bersaglio del teletrasporto stesso.) Ragionando sul fatto che i trasmettitori di ogni segnale avrebbero riconosciuto questo fatto, il personale del META ha cercato il segnale di 1420 megahertz tenendo conto di come potrebbe apparire spostato se provenisse da uno dei tre seguenti sistemi di riferimento: a) un sistema in moto assieme al nostro sistema locale di stelle; b) uno in moto solidalmente al centro della Galassia; c) uno in moto assieme al sistema definito dalla radiazione di fondo cosmica a microonde residua del big bang. Notiamo che queste avvertenze permettono di distinguere facilmente i segnali celesti da segnali terrestri, poiché questi sono emessi tutti in un sistema di riferimento fisso sulla superficie terrestre, che è diverso da ciascuno dei tre sistemi di riferimento specificati. I segnali terrestri hanno quindi un «suono» caratteristico di cicalino quando sono presenti nei dati del META.

Che cosa implicherebbe un segnale extraterrestre? Cocconi e Morrison suggerirono che noi potremmo cercare in esso i numeri primi iniziali: 2, 3, 5, 7, 11, 13… Questa è esattamente la sequenza che Picard, nell'episodio *Questione di lealtà,* continua a battere sulla tastiera che controlla la porta della stanza in cui è tenuto prigioniero con altri due esseri, per far capire agli alieni loro rapitori che hanno a che fare con organismi intelligenti. Gli impulsi provenienti, diciamo, da una tempesta sulla superficie di una stella difficilmente potrebbero produrre una tale sequenza. Il personale del META ha cercato un segnale ancora più semplice: un tono costante uniforme a una frequenza fissa. Una tale onda «portante» è facile da cercare.

Horowitz e l'astronomo della Cornell University Carl Sagan, suo collaboratore, hanno riferito i risultati di un'analisi compiuta sui dati raccolti in cinque anni dal META. Sono stati isolati 37 eventi candidati, su 100 bilioni di segnali scoperti. Nessuno di tali «segnali» si è però mai ripetuto. Horowitz e Sagan preferiscono interpretare i dati nel senso che finora non è emerso alcun segnale ben definito. Di conseguenza hanno potuto fissare limiti al numero di civiltà altamente avanzate a varie distanze dal nostro Sole che hanno tentato di comunicare con noi.

Dal tempo di quel primo esperimento, e dalla prima edizione di questo libro, sono stati compiuti una quantità di nuovi e più complessi esperimenti SETI (acronimo di *Search for Extraterrestrial Intelligence)* , e altri sono attualmente in corso. In effetti anche i lettori di questo libro possono partecipare alerca di esseri intelligenti extraterrestri attraverso il programma SETI *at home,* che permette di analizzare i dati raccolti dalle apparecchiature radioastronomiche di ascolto nelle numerose pause in cui parte della potenza dei propri home computer rimane inutilizzata. Inoltre sono stati impegnati anche nuovi tipi di programmi SETI ottici, che ricercano segnali ottici intermittenti. Quello che un tempo era un campo di ricerca solitario e limitato, oggi pullula di attività di ricercatori entusiasti.

Nonostante l'incredibile complessità degli attuali sforzi di ricerca, è stato tuttavia realmente esplorato solo un piccolo ambito di frequenze, e la potenza dei segnali che possono essere captati dai radiotelescopi è immensa, molto maggiore della potenza totale generata da tutta l'attività umana sulla Terra. Perciò non ci sono ancora ragioni di pessimismo. La nostra è una grande galassia.

La ricerca continua. Il fatto che non abbiamo ancora udito niente non dovrebbe dissuaderci. È qualcosa di simile a ciò che il mio amico Sidney Coleman, professore di fisica a Harvard, mi disse una volta sul fatto di comprare una casa: «Non devi scoraggiarti se ne guardi cento e non ne trovi una. Te ne deve piacere solo una…» Un singolo segnale ben definito – per quanto sia bassa la probabilità di poterlo ricevere un giorno – cambierebbe il nostro modo di concepire l'universo, e annuncerebbe l'inizio di una nuova èra nell'evoluzione del genere umano.

E a quelli di voi che possono essere scoraggiati dall'idea che il nostro primo contatto con civiltà extraterrestri non

avvenga attraverso nostre astronavi che scenderanno su lontani pianeti, dico di ricordare i Citeriani, una civiltà molto avanzata incontrata dall'*Enterprise,* la quale prese contatto con altre civiltà non viaggiando nello spazio essa stessa, ma facendo arrivare a sé i viaggiatori spaziali. In un certo senso, questo è esattamente ciò che facciamo noi quando ascoltiamo i segnali provenienti dalle stelle.

9. *Lo zoo delie possibilità*

"Questa è l'esplorazione che vi attende!
Non determinare la posizione delle stelle e studiare le nebulose,
ma scandagliare le possibilità ignote dell'esistenza."
Q a Picard, in Ieri, oggi e domani, II

NEL corso dei più di diciannove anni-TV delle varie serie di *Star Trek,* gli autori hanno avuto la possibilità di toccare alcune fra le idee più interessanti appartenenti a tutti i campi della fisica. A volte le usano correttamente; altre volte le dilatano. A volte si limitano a usare le parole dei fisici, e altre volte raccolgono anche le idee a esse associate. Gli argomenti di cui si sono occupati formano una vera e propria rassegna della fisica moderna: relatività ristretta, relatività generale, cosmologia, fisica delle particelle, viaggi nel tempo, curvatura dello spazio e fluttuazioni quantiche, per citarne solo alcuni.

Ho pensato che in questo penultimo capitolo potrebbe essere utile fare una breve presentazione di alcune fra le idee più interessanti della fisica moderna usate dagli autori di *Star Trek,* occupandomi particolarmente di concetti su cui non mi sono concentrato altrove nel libro. A causa della loro eterogeneità, le darò qui in una sorta di glossario, ma senza una particolare forma di ordinamento, alfabetica o tematica. Nell'ultimo capitolo adotterò un modo di procedere analogo: in tal caso però per additare gli errori di fisica più grossolani della serie, quali sono stati scelti da me, da alcuni miei colleghi fisici e da vari trekker. In entrambi i capitoli ho limitato il mio elenco di esempi ai *top ten;* in realtà se ne potrebbero citare molti altri.

La scala della Galassia e dell'universo

La nostra Galassia è la scena su cui si rappresenta il dramma di *Star Trek.* In tutta la serie televisiva scale di distanze galattiche di vario genere svolgono un ruolo cruciale nell'azione. Si passa dalle UA (Unità Astronomiche: 1 UA = 149.597.000 km, la distanza media dalla Terra al Sole), che furono usate per descrivere la grandezza della nube di V'ger, nel primo film di *Star Trek,* agli anni-luce. Inoltre vengono presentati vari elementi della nostra Galassia, compresa una «Grande Barriera» al suo centro (*Star Trek V: L'ultima frontiera*) e, nella serie originale, una «barriera galattica» al suo bordo (cfr. gli episodi *Oltre la Galassia, Con qualsiasi nome* e *Bellezza è verità?*). Sembra perciò appropriato, per descrivere la scena su cui ha luogo l'azione di *Star Trek,* offrire il quadro attuale della Galassia e dei sistemi stellari vicini, e delle scale di distanze nell'universo.

Raramente le distanze astronomiche vengono espresse in unità convenzionali come i chilometri, a causa del gran numero di cifre che si richiederebbero. Gli astronomi hanno creato invece varie unità di riferimento che sembrano più appropriate. Una di esse è la già citata UA, la distanza fra la Terra e il Sole. Questa è l'unità di distanza usata normalmente nel sistema solare, dove Plutone, l'ultima Thule, si trova a circa 40 UA dal Sole. In *Star Trek,* il primo film della serie cinematografica, si dice che la nube di V'ger ha un diametro di 82 UA, che è considerevolmente grande: in effetti è più grande di quello del nostro sistema solare!

Per confronto con le distanze interstellari, è utile esprimere la distanza Terra-Sole in funzione del tempo che impiega la luce (o che impiegherebbe l'*Enterprise* viaggiando a curvatura 1) per percorrere la distanza che separa il Sole dalla Terra: circa 8 minuti. (Questo dovrebbe essere anche il tempo impiegato dalla luce ad arrivare alla maggior parte dei pianeti della Classe M dal loro Sole.) Possiamo dire dunque che un'uA è pari a 8 minuti-luce. Per confronto, la distanza della stella più vicina a noi, Alpha Centauri – un sistema stellare binario in cui viveva a quanto pare l'inventore del motore di curvatura, Zefrem Cochrane – è di circa 4 anni-luce! Questa è una distanza normale fra stelle nella nostra regione della Galassia. I razzi, alle velocità raggiungibili oggi, impiegherebbero più di 10.000 anni per coprire la distanza fra noi e Alpha Centauri. A curvatura 9, che è circa 1500 volte superiore alla velocità della luce, occorrerebbero quasi 6 ore per percorrere un anno-luce.

La distanza dal Sole al centro della Galassia è di circa 25.000 anni-luce. A curvatura 9 occorrerebbero almeno 15 anni per percorrere questa distanza; è quindi improbabile che Sybok, essendosi impadronito con la forza dell'*Enterprise,* fosse in grado di portarla al centro della Galassia, come fece in *Star Trek V: L'ultima frontiera,* a meno che l'*Enterprise* non ci fosse già.

Il nostro sistema della Via Lattea è una galassia a spirale, con un grande disco centrale di stelle. Esso ha un diametro di circa 100.000 anni-luce e uno spessore di alcune migliaia di anni-luce. Il *Voyager,* allontanatosi 70.000 anni-luce dalla Terra nel primo episodio della serie cinematografica, doveva trovarsi quindi dall'altro lato della Galassia. A curvatura 9, l'astronave avrebbe dovuto impiegare una cinquantina d'anni a tornare da quella distanza alla regione del Sole.

Al centro della Galassia c'è un grande rigonfiamento – un denso agglomerato di stelle – del diametro di varie migliaia di

anni-luce. Si pensa che al suo centro ci sia un buco nero di un migliaio di masse solari. Buchi neri di massa compresa fra 100.000 e più di un miliardo di masse solari si trovano probabilmente al centro di molte altre galassie.

La Galassia è circondata da un alone grosso modo sferico di stelle molto vecchie. Le aggregazioni di migliaia di stelle, dette ammassi globulari, che vi si trovano, sono considerate fra gli oggetti più vecchi della nostra Galassia, avendo forse anche 12-13 miliardi di anni secondo i nostri metodi di datazione attuali: essi sarebbero quindi più vecchi persino dell'ammasso nero» nell'episodio *Un eroe da imitare,* che si diceva avesse 9 miliardi di anni. Si pensa che la Galassia sia immersa in un alone sferico ancora più grande, formato da «materia oscura» (della quale parleremo più avanti). Questo alone è invisibile a qualsiasi tipo di telescopio; se ne inferisce l'esistenza dai moti delle stelle e dei gas nella Galassia; esso potrebbe contenere una quantità di massa 10 volte maggiore di quella contenuta nella Galassia osservabile.

Il sistema della Via Lattea è una galassia a spirale di dimensioni medie e contiene alcune centinaia di miliardi di stelle. Nell'universo osservabile ci sono approssimativamente 400 miliardi di galassie, ognuna delle quali contenente più o meno quel numero di stelle! Delle galassie che vediamo, il 70 per cento circa sono spirali; le altre sono in qualche misura sferiche e sono note come galassie ellittiche. Quelle di dimensioni maggiori sono le galassie ellittiche giganti, che hanno una massa più di 10 volte maggiore di quella della nostra Galassia.

La maggior parte delle galassie sono riunite in gruppi. Nel cosiddetto «Gruppo locale», le galassie più vicine alla nostra sono due piccoli sistemi satelliti orbitanti attorno alla nostra Galassia della Via Lattea. Tali oggetti, che sono osservabili nell'emisfero australe, sono noti come la Grande e la Piccola Nube di Magellano, e si trovano a meno di 200.000 anni-luce da noi. Circa 2 milioni di anni-luce ci separano dalla grande galassia più vicina a noi, la Galassia di Andromeda, patria dei Kelvani, che tentarono di impadronirsi *dell'Enterprise* e di tornare alla loro galassia nell'episodio della serie originale *Con qualsiasi nome.* Alla curvatura 9, tale viaggio richiederebbe un migliaio di anni!

A causa del tempo impiegato dalla luce nella sua propagazione, quanto più lontano osserviamo nello spazio tanto più lontano spingiamo il nostro sguardo anche nel tempo. La distanza maggiore a cui possiamo osservare oggi l'universo con sensori elettromagnetici corrisponde a un tempo in cui l'universo aveva un'età di circa 300.000 anni. Prima di allora la materia esisteva nella forma di gas ionizzato caldissimo, opaco alla radiazione elettromagnetica. Guardando in tutte le direzioni, vediamo la radiazione emessa quando materia e radiazione finalmente si «disaccoppiarono». Essa è nota come radiazione cosmica di fondo a microonde. Attraverso l'osservazione recentissima di questa radiazione con gli strumenti del COBE, il satellite Cosmic Background Explorer messo in orbita dalla NASA nel 1989, abbiamo ottenuto un'immagine dell'universo quando aveva solo 300.000 anni. L'immagine rivelò strutture (anisotropie) che si erano probabilmente delineate nei primissimi istanti del big bang ed era così significativa che due dei principali investigatori del COBE (John C. Mather del Goddard Space Flight Center della NASA a Green-belt e George F. Smoot dell'Università della California a Berkeley) ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 2006.

Infine, l'universo si sta espandendo in modo uniforme. Di conseguenza vediamo le galassie lontane recedere da noi, e tanto più velocemente quanto più sono lontane, con una velocità che è direttamente proporzionale alla loro distanza da noi. Questa velocità di espansione, caratterizzata da una quantità nota come costante di Hubble, è tale che le galassie che si trovano a 10 milioni di anni-luce da noi stanno allontanandosi da noi a una velocità media di 150-300 km al secondo. Calcolando a ritroso, troviamo che tutte le galassie osservate dell'universo dovevano trovarsi riunite intorno a 14 miliardi di anni fa, al tempo del big bang. Come ho già detto in precedenza, poiché la maggior parte dell'energia nell'universo risiede a quanto pare nello spazio vuoto, il ritmo dell'espansione dell'universo sta accelerando, non rallentando.

La materia oscura

Come ho detto sopra, la nostra Galassia è immersa a quanto pare in un vasto mare di materia invisibile[18]. Studiando il moto delle stelle, delle nubi di idrogeno e persino della Grande e Piccola Nube di Magellano, e usando le leggi di Newton, che mettono in relazione la velocità di oggetti nel loro moto orbitale e la massa che li attrae, si è stabilito che esiste un alone grosso modo sferico di materia oscura che si estende fino a distanze dal centro della Galassia forse dieci volte maggiori della nostra. Questa materia costituisce almeno per il 90 per cento la massa della Galassia della Via Lattea. Inoltre, osservando il moto di altre galassie, comprese quelle ellittiche, nonché quello di gruppi di galassie, troviamo che a questi sistemi è associata più materia di quella che possiamo spiegare sulla base del materiale osservabile. L'intero universo osservabile sembra essere perciò dominato dalla materia oscura. Attualmente si ritiene che questo materiale, più del 90 per cento del quale è oscuro, rappresenti il 30 per cento circa dell'energia totale dell'universo, mentre il 70 per cento restante risiederebbe nell'energia dello spazio vuoto.

La nozione di materia oscura si è insinuata sia nella serie *The Next Generation* sia nella serie *Voyager,* e in un modo

divertente. Per esempio, nell'episodio *Intruso a bordo,* della serie *Voyager,* l'astronave entra in una «nebulosa di materia oscura», la quale, come si può facilmente immaginare, assomiglia a una nube buia, cosicché al suo interno non si riesce a vedere niente.

L'Enterprise si era già imbattuta in oggetti del genere, compreso l'«ammasso nero» già menzionato in precedenza. In *Deep Space Nine* anche Benjamin Sisko cerca rifugio in una nube di materia oscura. La proprietà più notevole della materia oscura, però, non è il fatto di schermare in qualche modo la luce, ma di non risplendere – ossia di non emettere radiazione – e di non assorbirne neppure quantità significative. Se facesse l'una o l'altra cosa potrebbe essere rivelata da telescopi. Se fossimo all'interno di una nube di materia oscura, come forse effettivamente siamo, non la vedremmo neppure. In effetti, in un episodio della serie *Enterprise* – che pur essendo stata prodotta come ultima serie di *Star Trek,* racconta gli eventi di un periodo anteriore di un secolo e mezzo rispetto alla Serie classica del capitano Kirk e del tenente Spock – il capitano Archer scopre qualcosa di un po' più realistico delle nebulose di materia oscura, un qualcosa che è in effetti invisibile. Infine il capitano e la vulcaniana T'Pol, ufficiale scientifico dell'*Enterprise,* decidono di fare esplodere contro quella massa di materia oscura una successione di testate nucleari, che eccitano la materia oscura rendendola luminosa. Benché non sia impossibile immaginare un fenomeno del genere, questo è sicuramente un comportamento fuori dall'ordinario per le particelle che noi consideriamo attualmente le migliori candidate per la materia oscura.

Il problema della natura, dell'origine e della distribuzione della materia oscura è probabilmente uno dei problemi non risolti più interessanti della cosmologia attuale. Poiché questo materiale ignoto domina la densità di massa dell'universo, la sua distribuzione deve avere determinato come e quando la materia osservabile subì il collasso gravitazionale formando gli ammassi galattici, le galassie, le stelle e i pianeti che rendono l'universo così interessante per noi. La nostra stessa esistenza dipende da questo materiale.

Ancora più interessanti sono i forti argomenti a sostegno della tesi che la materia oscura potrebbe essere composta da particelle completamente diverse dai protoni e dai neutroni che compongono la normale materia. Limiti indipendenti alla quantità di materia normale nell'universo, fondati su calcoli della rapidità delle reazioni nucleari nell'universo primordiale e della successiva formazione di elementi leggeri, ci inducono a pensare che potrebbero non esistere abbastanza protoni e neutroni per spiegare la materia oscura esistente attorno alle galassie e agli ammassi. Pare inoltre che, per rendere possibile il collasso delle piccole fluttuazioni presenti nella distribuzione iniziale della materia, dalle quali derivò il plasma caldissimo dell'universo primordiale che diede poi origine alle galassie e agli ammassi che osserviamo oggi, si richiedesse un qualche tipo nuovo di particelle, non interagenti con la radiazione elettromagnetica. Se la materia oscura è composta effettivamente da qualche nuovo tipo di particelle elementari, allora:

a) la materia oscura non è solo «là fuori» nell'universo, ma è in questa stanza mentre stai leggendo questo libro, e attraversa il tuo corpo senza poter essere percepita. Queste particelle elementari esotiche non si aggregarono in oggetti astronomici; esse formarono un «gas» diffuso che scorre nell'intera Galassia. Poiché, nella migliore delle ipotesi, interagiscono solo molto debolmente con la materia, potrebbero attraversare senza ostacolo oggetti grandi come la Terra. In effetti esempi di tali particelle già esistono in natura; fra di esse si ricordano particolarmente i neutrini (particelle che dovrebbero essere familiari ai trekker, e di cui ci occuperemo più avanti).

b) La materia oscura potrebbe essere rivelata direttamente qui sulla Terra, usando tecniche avanzate di osservazione di particelle elementari. Sono attualmente in costruzione vari rivelatori progettati con una sensibilità adeguata per diversi candidati a componenti della materia oscura.

c) La scoperta di tali particelle potrebbe rivoluzionare la fisica delle particelle elementari. È molto probabile che questi oggetti siano i residui di processi di produzione della primissima fase dell'inizio dell'universo, molto tempo prima che esso raggiungesse l'età di un secondo, e che siano quindi connessi alla fisica a scale di energia comparabili o addirittura superiori a quelle che noi possiamo scandagliare direttamente usando i moderni acceleratori.

Per quanto possa essere interessante questa possibilità, non abbiamo ancora la certezza che la materia oscura non possa essere fatta di materia meno esotica. Ci sono molti modi per combinare protoni e neutroni così che non risplendano. Per esempio, se riempissimo la Galassia di palle di neve o di macigni, sarebbe difficile scoprirli. Forse la cosa più probabile è che nella Galassia ci siano molti oggetti quasi abbastanza grandi per essere stelle ma troppo piccoli perché la loro massa riesca a innescare l'inizio di reazioni nucleari nella loro regione più interna. Questi oggetti sono noti come nane brune, e Data e i suoi colleghi a bordo dell'*Enterprise* ne hanno discusso (per esempio nell'episodio *Caccia all'uomo).* In effetti, proprio di questi tempi sono in corso esperimenti per accertare se le nane brune – note in questo contesto come MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) – formino o no una componente significativa dell'alone di materia oscura

attorno alla Galassia della Via Lattea. Benché questi oggetti non siano osservabili direttamente, se uno di loro passasse davanti a una stella, la luce di questa risentirebbe della gravità del MACHO, e la stella stessa sembrerebbe più luminosa. Questo fenomeno di «lente gravitazionale» fu predetto per la prima volta da Einstein già negli anni '30, e noi oggi possediamo la tecnologia adatta per scoprirlo. Nel corso di vari esperimenti, ogni notte nella nostra Galassia si stanno osservando letteralmente milioni di stelle, per accertare se il fenomeno si verifichi effettivamente. La sensibilità finora conseguita è sufficiente a scoprire un alone di materia oscura composto da MACHO, se questi formano effettivamente la maggior parte della materia oscura che circonda la nostra Galassia.

Stelle di neutroni

Questi oggetti sono, come ricorderete, tutto ciò che rimane dei nuclei collassati di stelle di grande massa esplose come supernovae. Pur contenendo di norma una massa un po' superiore a quella del Sole, le stelle di neutroni sono così compresse da avere press'a poco le dimensioni di Manhattan! Ancora una volta, gli autori di *Star Trek* si sono superati nel campo della nomenclatura. L'*Enterprise* si è imbattuta varie volte in materiale espulso da una stella di neutroni, materiale che gli autori hanno chiamato «neutronio». Poiché una stella di neutroni è composta quasi per intero da neutroni così compattati che essa finisce per essere fondamentalmente un immenso nucleo atomico, il nome è scelto bene. La macchina del giudizio universale, nell'episodio omonimo, era fatta a quanto pare di puro neutronio, e proprio perciò era inattaccabile dalle armi della Federazione. Tale materiale, però, per essere stabile, dovrebbe essere mantenuto sotto la pressione incredibilmente alta creata dall'attrazione gravitazionale di una massa stellare di materiale concentrato in un oggetto di soli 15 km di raggio. Nel mondo reale, tale materiale esiste solo in una stella di neutroni.

L'Enterprise ha avuto vari incontri ravvicinati con stelle di neutroni. Nell'episodio *Evoluzione,* quando i Naniti cominciarono a mangiare i computer della nave, l'equipaggio stava studiando una stella di neutroni in una fase di aggregazione di nuovo materiale che sembrava in procinto di eruttare. Nell'episodio *Una società perfetta* l'*Enterprise* dovette deflettere un frammento di un nucleo stellare che si muoveva velocemente verso Moab IV.

Nella Galassia ci sono senza dubbio milioni di stelle di neutroni. Queste hanno per lo più al loro interno, fin dalla loro origine, campi magnetici incredibilmente grandi. Se ruotano rapidamente formano meravigliosi radiofari. La radiazione viene emessa da ciascuno dei loro due poli, e se il campo magnetico è inclinato rispetto all'asse di rotazione si crea un faro rotante. Sulla Terra noi osserviamo questi impulsi periodici di onde radio e ne chiamiamo pulsar le sorgenti. Ruotando nello spazio, le pulsar sono i migliori orologi che si conoscano nell'universo. I segnali delle pulsar possono segnare il tempo con un margine d'errore inferiore a un microsecondo all'anno. Alcune pulsar, inoltre, producono più di 1000 impulsi al secondo. Ciò significa che un oggetto che è essenzialmente un gigantesco nucleo atomico con la massa del Sole e un diametro di 10-20 km compie più di 1000 rotazioni al secondo. Pensateci un po'. La velocità di rotazione lineare alla superficie di una stella di neutroni è perciò di quasi metà della velocità della luce! Le pulsar sono una dimostrazione del fatto che la natura produce oggetti più notevoli di qualsiasi cosa possano inventare gli autori di *Star Trek.*

Altre dimensioni

Mentre James T. Kirk scivola lentamente dentro e fuori di quest'universo nella *Ragnatela tholiana,* noi troviamo che la causa di tale fenomeno è un'«interfase spaziale», la quale connette per breve tempo piani dimensionali diversi che formerebbero altrimenti degli «universi paralleli». Altre due volte nella serie Kirk si era imbattuto in universi paralleli: uno fatto di antimateria, in *L'alternativa,* e l'altro a cui aveva avuto accesso attraverso il teletrasporto, in *Specchio, specchio.* Nella serie *The Next Generation* abbiamo il Q-continuo, il tempo non lineare, «finestra aperta su altre dimensioni», del dottor Paul Manheim, e ovviamente il subspazio stesso, contenente un numero infinito di dimensioni, in cui possono nascondersi alieni, come quelli che rapirono il tenente Riker in *Sonni pericolosi.*

La nozione che in qualche modo le quattro dimensioni dello spazio e del tempo in cui viviamo non esauriscano la realtà è radicata tenacemente nella coscienza popolare. Recentemente uno psichiatra di Harvard (creandosi a quanto pare difficoltà con la Medical School), ha scritto un libro di successo nel quale ha riferito i risultati delle sue analisi di una varietà di pazienti che sostenevano tutti di essere stati rapiti da alieni. In un'intervista, alla domanda da dove venivano gli alieni, egli avrebbe risposto: «Da un'altra dimensione».

Quest'attrazione per un mondo con dimensioni extra risentì evidentemente l'influenza della teoria della relatività ristretta, come ho descritto nel mio libro recente *Dietro lo specchio* (Codice, Torino 2007). Una volta che lo spazio tridimensionale fu

connesso al tempo da Hermann Minkowski a formare lo spazio-tempo quadridimensionale, era naturale supporre che il processo potesse continuare. Inoltre, una volta che la relatività generale ebbe dimostrato che quella che percepiamo come forza di gravità potrebbe essere associata alla curvatura dello spazio-tempo, non era irragionevole congetturare che altre forze potessero essere associate alla curvatura in altre dimensioni ancora.

Fra i primi a speculare su quest'idea ci furono il fisico polacco Theodor Kaluza nel 1919 e, indipendentemente da lui, il fisico svedese Oskar Klein nel 1926. Essi suggerirono che l'elettromagnetismo potrebbe essere unificato con la gravità in un universo a cinque dimensioni. Può darsi che la forza elettromagnetica sia connessa a una qualche «curvatura» in una quinta dimensione, come la forza gravitazionale è dovuta alla curvatura nello spazio-tempo quadridimensionale.

Questa è un'idea molto bella, ma presenta dei problemi.

In effetti, in ogni scenario in cui si considerano dimensioni extra nell'universo, si deve spiegare *perché non percepiamo queste dimensioni mentre sperimentiamo lo spazio e il tempo.* La risposta che si dà a questa domanda è molto importante, perché si ripresenta ripetutamente quando i fisici considerano la possibilità di dimensioni superiori nell'universo.

Consideriamo un cilindro e un insetto intelligente. Purché la circonferenza del cilindro sia grande rispetto alle dimensioni dell'insetto, questo può muoversi in entrambe le dimensioni rendendosi conto che si sposta su una superficie bidimensionale.

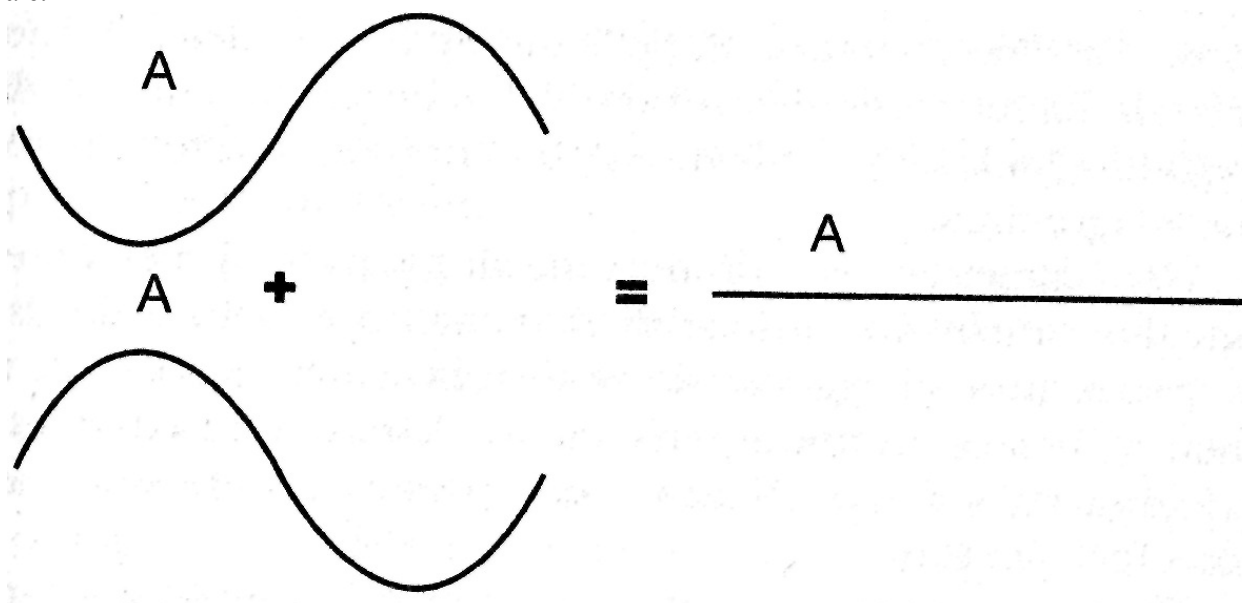



Figura 11

Se però la circonferenza del cilindro diventa molto piccola, l'insetto finisce col muoversi su un oggetto unidimensionale – ossia una linea o uno spago – e può spostarsi solo verso l'alto o verso il basso.

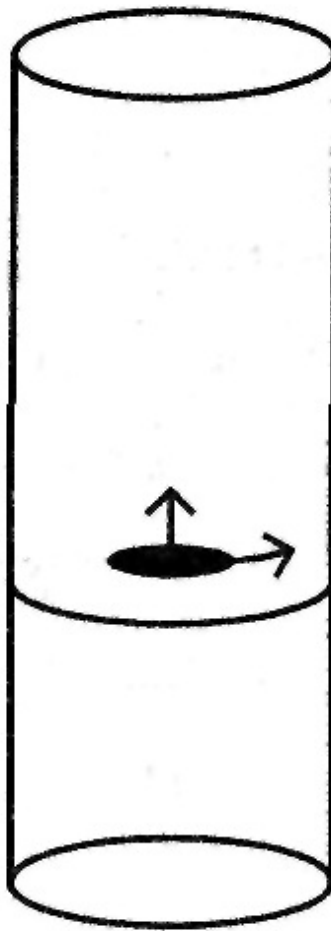



Figura 12

Pensiamo ora in che modo un tale insetto potrebbe accorgersi che esiste un'altra dimensione, corrispondente alla circonferenza del cilindro. Con un microscopio, egli potrebbe essere in grado di rendersi conto dello spessore dello spago. La lunghezza d'onda della radiazione necessaria per risolvere dimensioni così piccole dovrebbe essere però dell'ordine del diametro del cilindro o meno, poiché, come ho notato nel capitolo 5, le onde si diffondono solo su oggetti di dimensioni almeno paragonabili alla loro lunghezza d'onda. Poiché l'energia di radiazione aumenta al diminuire della lunghezza d'onda, per risolvere questa «dimensione extra» si richiederebbe una certa energia minima di radiazione.

Se una quinta dimensione fosse in qualche modo «arrotolata» in un piccolo cerchio, non potremmo far passare delle onde attraverso di essa per sondarne l'esistenza se non focalizzando una grande quantità di energia in un piccolo punto, senza di che il mondo continuerebbe ad apparirci quadridimensionale a ogni effetto. Dopo tutto, noi sappiamo che lo spazio è tridimensionale perché possiamo sondarlo con onde che si propagano nelle tre dimensioni. Se le uniche onde che possono essere inviate nella quinta dimensione devono avere un'energia molto maggiore di quella che possiamo produrre anche in acceleratori molto potenti, non abbiamo alcuna possibilità di sperimentare questa dimensione extra.

Nonostante il suo interesse intrinseco, la teoria di Kaluza-Klein non può essere una teoria completa. Innanzitutto non spiega *perché* la quinta dimensione dovrebbe essere arrotolata in un piccolo cerchio. In secondo luogo, noi oggi conosciamo altre due forze fondamentali in natura oltre all'elettromagnetismo e alla gravità: la forza nucleare forte e la forza nucleare debole. Perché fermarsi alla quinta dimensione? Perché non includere abbastanza dimensioni extra da poter spiegare tutte le forze fondamentali?

La moderna fisica delle particelle ha prospettato in effetti proprio una tale possibilità. Lo sforzo moderno, fondato sulla cosiddetta teoria delle superstringhe, si concentrò inizialmente su un tentativo di estendere la teoria generale della relatività in modo da poter costruire una teoria consistente della gravità quantistica. Infine è però riemerso l'obiettivo di una teoria unificata di tutte le interazioni.

Ho già notato quali difficoltà si frappongano allo sviluppo di una teoria nella quale la relatività generale si concili con la gravità quantistica. La difficoltà principale in questo sforzo è quella di tentare di capire come si possano manipolare le fluttuazioni quantiche nello spazio-tempo. Nella teoria delle particelle elementari, le eccitazioni quantiche nei campi – per esempio il campo elettrico – si manifestano come particelle elementari, o quanti. Nel tentativo di capire le eccitazioni quantiche nel campo gravitazionale – che nella relatività generale corrispondono a eccitazioni quantiche dello spazio-tempo – la matematica conduce invece a predizioni prive di senso.

Il progresso della teoria delle stringhe consistette nel supporre che a livelli microscopici – tipici delle scale molto piccole (ossia di 10^{-33} cm) a cui potrebbero essere importanti effetti gravitazionali quantistici – quelle che noi consideriamo particelle elementari puntiformi potrebbe essere risolte come stringhe vibranti. La massa di ogni particella corrisponderebbe in qualche senso all'energia di vibrazione di tali stringhe.

La ragione per fare questa proposta, sotto altri aspetti piuttosto bizzarra, è che, già negli anni '70, si scoprì che tale teoria richiede l'esistenza di particelle aventi le proprietà che dovrebbero avere le eccitazioni quantiche nello spazio-tempo, note come gravitoni. La relatività generale è quindi in un certo senso inclusa nella teoria, in un modo che potrebbe essere in accordo con la meccanica quantistica.

Una teoria quantistica delle stringhe non può tuttavia essere resa matematicamente consistente nelle quattro dimensioni, e neppure in cinque o in sei. Risulta che teorie del genere possono esistere in modo consistente solo in dieci dimensioni, o forse solo in 26! In effetti il tenente Reginald Barclay, mentre possedeva temporaneamente un quoziente di intelligenza di 1200 dopo essere stato folgorato da una sonda citeriana, ebbe una discussione con Einstein sul ponte ologrammi circa quale di queste due possibilità fosse preferibile per includere la meccanica quantistica nella relatività generale.

Questo gran numero di dimensioni può sembrare un impaccio, ma si riconobbe prontamente che, come molte difficoltà apparenti, offriva anche un'opportunità. Forse tutte le forze fondamentali in natura potrebbero essere incorporate in una teoria di 10 o più dimensioni, nella quale tutte le dimensioni tranne le quattro che conosciamo si arrotolano – come sospettò il tenente Barclay – fino ad avere diametri dell'ordine della scala di Planck (10^{-33} cm), e non sono oggi quindi misurabili.

Purtroppo questa grande speranza non ha finora permesso di fare grandi passi avanti. Dopo trentacinque anni non sappiamo se le proposte provvisorie della teoria delle stringhe possano produrre una «teoria del tutto». In effetti la teoria ha continuato a compiere metamorfosi nel corso del tempo, cosicché le stringhe stesse potrebbero non essere più una parte importante della teoria, e persino il numero delle dimensioni associate alla teoria è incerto, come accade in ogni meccanismo in cui solo quattro dimensioni finiscono per rimanere visibili. E infine, come ho accennato in precedenza, la teoria non potrebbe in definitiva predire neppure un universo privo di ambiguità come il nostro, bensì piuttosto una quantità di universi, uno dei quali potrebbe assomigliare al nostro. La teoria assomiglierebbe quindi più a una «teoria di qualsiasi cosa» che a una «teoria del tutto», o addirittura a una «teoria di qualcosa».

La morale di tutto questo è quindi che, sì, nell'universo possono esserci dimensioni extra, e oggi c'è qualche ragione per attenderci che ci siano. Queste dimensioni extra non sono però tali da poter celare alieni in grado di rapire pazienti psichiatrici (e neppure il comandante Riker). Esse non sono «universi paralleli». Né possono essere mescolate con le quattro dimensioni dello spazio-tempo in un modo che permetta agli oggetti di spostarsi da un luogo dello spazio a un altro passando per un'altra dimensione, come sembra permettere il «subspazio» nell'universo di *Star Trek.*

Tuttavia negli ultimi dieci anni sono state proposte nella fisica teorica varie nuove possibilità interessanti che assomigliano più da vicino alle dimensioni extra di *Star Trek.* È stato riconosciuto che se nelle dimensioni extra potesse agire solo la gravità, che è una forza estremamente debole, queste dimensioni extra potrebbero restare invisibili anche se sono molto grandi. Questa possibilità ha suscitato molto interesse perché grandi dimensioni extra potrebbero in linea di principio essere rivelabili da nuove serie di esperimenti, alcuni dei quali potrebbero implicare misurazioni delle proprietà della gravità su una varietà di scale, oppure potrebbero comportare la ricerca di fenomeni esotici in nuovi acceleratori di particelle. Pur essendo questo effettivamente un passo molto grande, è tuttavia affascinante pensare che il nostro universo potrebbe essere racchiuso addirittura in uno spazio infinito di dimensioni superiori, il quale potrebbe contenere universi «vicini» quadridimensionali o di un numero di dimensioni maggiore, nei quali potrebbero esistere altre galassie, pianeti, e persino alieni, alla maniera di *Star Trek.* L'unica differenza è che questi universi resteranno sempre fuori della nostra portata, perché i nostri atomi, e le forze che li legano, potrebbero operare solo nel nostro spazio quadridimensionale. Così, benché queste idee richiamino alla memoria il film *Le avventure di Buckaroo Banzai* attraverso l'ottava dimensione (che ha curiosamente una connessione con Star Trek: io una volta lessi una citazione dal film stampata in nitidi caratteri in rilievo sull'ascensore del set di *Deep Space Nine* quando lo visitai insieme a Michael Okuda), sia lui sia il comandante Riker sarebbero stati al sicuro dagli invasori alieni.

Non possiamo tuttavia escludere con sicurezza che possano esistere «ponti» microscopici o anche macroscopici con universi altrimenti non connessi (o paralleli). Nella relatività generale, in effetti, regioni di curvatura molto elevata – all'interno di un buco nero, o in un tunnel spazio-temporale – possono essere concepite come in grado di collegare regioni dello spazio-tempo altrimenti non collegate e potenzialmente molto grandi. Sulla base della nostra immagine attuale dell'universo, non conosco nessuna ragione per attendermi tali fenomeni fuori dei buchi neri e dei tunnel (o cunicoli) spazio-temporali, ma poiché non possiamo escluderli, penso che le astronavi della Federazione siano libere di continuare a trovarli.

Anyoni[19]

Nell'episodio *Un 'altra dimensione,* della serie *The Next Generation,* l'esplosione del nucleo di un motore di una nave romulana determina il cattivo funzionamento di un dispositivo romulano di occultamento, che opera normalmente mettendo della materia «fuori fase» con altra materia; l'abbondanza di particelle di kroniton così create, combinandosi con l'azione del teletrasporto dell'*Enterprise,* fa sparire Geordi La Forge e Ro Laren. Essi sono considerati morti, e rimangono invisibili e immateriali fino a quando Data, facendo intensificare l'emissione di anyoni usati per disinfestare la nave dal kroniton, li fa tornare miracolosamente in fase.

Se gli autori di *Star Trek* non avevano mai sentito parlare di anyoni (e io scommetterei che sia così), la loro tendenza a inventare nomi appropriati appare veramente molto strana. Gli anyoni (*anyons*) sono costrutti teorici proposti e così chiamati dal mio amico Frank Wilczek, fisico all'Institute for Advanced Study a Princeton, e dai suoi collaboratori. Per inciso, Wilczek inventò anche un'altra particella, un candidato a particella della materia oscura, da lui chiamato assione (*axìon*), dal nome di un detersivo. «Chip assionici» compaiono in *Star Trek,* come parte della rete neurale di una macchina avanzata. Ma sto divagando.

Nello spazio tridimensionale in cui viviamo, le particelle elementari sono designate come fermioni e bosoni, a seconda del loro spin. Noi associamo a ogni tipo di particella elementare un numero quantico, che dà il valore del suo spin. Questo numero può essere intero (0, 1, 2…) o semintero (1/2, 3/2, 5/2…). Le particelle con spin intero sono dette bosoni, quelle con spin semintero fermioni. Fermioni e bosoni hanno un diverso comportamento quantomeccanico: quando due fermioni identici vengono interscambiati, la funzione d'onda quantomeccanica che descrive le loro proprietà è moltiplicata per -1, mentre in un interscambio di bosoni la funzione d'onda rimane immutata. Perciò due fermioni non possono mai trovarsi nello stesso posto perché, se così fosse, il loro interscambio lascerebbe la configurazione identica mentre la funzione d'onda dovrebbe essere moltiplicata per -1, e l'unica cosa che possa essere moltiplicata per -1 e rimanere identica è 0. La funzione d'onda, quindi, deve svanire. È questa l'origine del famoso principio di esclusione di Pauli – applicato in origine agli elettroni –, secondo il quale due fermioni identici non possono occupare lo stesso stato quantomeccanico.

In ogni caso risulta che, se si permette a delle particelle di muoversi solo in due dimensioni – come sono costretti a fare gli esseri bidimensionali incontrati dall'*Enterprise* (vedi la sezione seguente), o, fatto più pertinente, come accade nel mondo reale quando configurazioni atomiche in un cristallo sono disposte in modo tale che gli elettroni, per esempio, si muovono solo su un piano bidimensionale –, le regole quantomeccaniche classiche che si applicano nello spazio tridimensionale vengono modificate. Lo spin non è più quantizzato, e le particelle possono avere qualsiasi valore per questa quantità. Perciò, invece di fermi-*oni* o di bos-*oni*, si possono avere any-*oni* (*any-ons*). E questa l'origine del nome, e dell'idea che è stata esplorata da Wilczek e da altri.

Torniamo agli autori di *Star Trek:* trovo divertente che il numero per il quale viene moltiplicata la funzione d'onda di particelle quando queste vengono intercambiate si chiami una «fase». Le funzioni d'onda dei fermioni sono moltiplicate per una fase di -1, mentre i bosoni sono moltiplicati per una fase di 1 e quindi rimangono uguali. Gli anyoni sono

moltiplicati per una combinazione di 1 e di un numero immaginario (i numeri immaginari sono le radici quadrate di numeri negativi), e quindi sono «fuori fase» in un senso reale con particelle normali. Pare quindi più che opportuno che un'«emittente di anyoni» cambi la fase di qualcosa, no?

Stringhe cosmiche

Nell'episodio *La perdita,* della serie *The Next Generation,* l'equipaggio dell'*Enterprise* si imbatte in due esseri bidimensionali che si sono smarriti. Questi esseri vivono su un «frammento di stringhe cosmiche». Nell'episodio, questo viene descritto come un filamento di sottigliezza infinitesima nello spazio, che esercita un'attrazione gravitazionale molto intensa e che vibra con un insieme caratteristico di frequenze del «subspazio».

Le stringhe cosmiche sono oggetti che sarebbero stati creati durante una transizione di fase nell'universo primordiale. Uno degli esperti mondiali su questi oggetti teorici è entrato recentemente a far parte del corpo docente della Case Western Reserve University, cosicché negli ultimi tempi ne ho sentito parlare molto. Le loro proprietà sarebbero simili sotto qualche aspetto a quelle dell'oggetto incontrato dall'*Enterprise.*

Durante una transizione di fase – come quando l'acqua bolle o si trasforma in ghiaccio – si ha un cambiamento nella configurazione delle particelle che compongono un materiale. Quando l'acqua gela si forma una struttura cristallina. Cristalli allineati in molte direzioni, crescendo, possono incontrarsi formando linee casuali, le quali creano le figure, così gradevoli

alla vista, sui vetri di una finestra d'inverno. Durante una transizione di fase nell'universo primordiale cambia la configurazione della materia, della radiazione e anche dello spazio vuoto (che vi ricordo può essere portatore di energia). A volte, durante queste transizioni, regioni diverse dell'universo si rilassano in configurazioni differenti. Anche queste configurazioni, crescendo, possono infine incontrarsi, a volte in un punto e a volte lungo una linea, segnando un confine fra le regioni. L'energia viene intrappolata in questa linea di confine, e forma quella che chiamiamo una stringa cosmica.

Non abbiamo idea se le stringhe cosmiche siano state create effettivamente agli inizi dell'universo, ma se è stato così e si sono conservate fino a oggi potrebbero produrre qualche effetto affascinante. Esse sarebbero infinitesimamente sottili – più sottili di un protone – e tuttavia sarebbero portatrici di una massa di densità enorme, fino a un bilione di tonnellate per centimetro. Potrebbero formare per esempio i semi attorno ai quali la materia collassa a formare galassie. Inoltre «vibrerebbero», producendo non armoniche subspaziali ma onde gravitazionali. Noi potremmo benissimo scoprire la presenza di una stringa cosmica sotto forma di un'onda gravitazionale prima di avere mai osservato la stringa stessa.

Nello scorso decennio le stringhe cosmiche hanno assunto un nuovo indirizzo, con i teorici delle stringhe che stanno tentando di indurle a entrare in azione. Qualcuno ha congetturato che le stringhe fondamentali, questi oggetti che vibrano in 10 o 11 dimensioni, avrebbero potuto produrre avanzi quadridimensionali che potrebbero essere grandi stringhe cosmiche macroscopiche create agli inizi dell'universo, producendo tutti gli effetti attribuiti alle stringhe cosmiche investigate in precedenza, e altri ancora. Oggi non rimangono prove di tutto questo, ma questi sviluppi hanno suscitato nuovo interesse per l'analisi di scenari in cui tali oggetti potrebbero rivelare effetti cosmologici nelle osservazioni.

Tanto basti sulle somiglianze con la stringa di *Star Trek.* Passiamo ora alle differenze. A causa del modo in cui si formano, le stringhe cosmiche non possono esistere in frammenti. Esse devono esistere o in anelli chiusi o nella forma di una singola lunga stringa che si snoda nell'universo. Inoltre, nonostante la loro grande densità di massa, le stringhe cosmiche non esercitano alcuna forza gravitazionale su oggetti lontani. Solo se una stringa cosmica passa vicino a un oggetto, questo sente un'improvvisa forza gravitazionale. Questi, però, sono aspetti sottili; si può dire che, nell'insieme, gli autori di *Star Trek* se la sono cavata benissimo con le stringhe cosmiche.

Misurazioni quantistiche

Nell'ultima stagione della serie *The Next Generation* c'è un episodio molto bello, intitolato *Paralleli,* in cui Worf comincia a saltare fra diverse «realtà quantiche». L'episodio tocca, anche se in modo scorretto, uno degli aspetti più affascinanti della meccanica quantistica: la teoria della misurazione quantistica.

Poiché la scala a cui viviamo non ci permette di osservare direttamente fenomeni quantomeccanici, la nostra immagine fisica intuitiva dell'universo ha un carattere classico. Quando parliamo di meccanica quantistica usiamo in generale un linguaggio classico, in modo da cercare di spiegare il mondo quantomeccanico in termini a noi comprensibili. Questo approccio, che viene chiamato di solito «l'interpretazione della meccanica quantistica» e che affascina alcuni filosofi della scienza, è arretrato; quel che dovremmo in realtà discutere è «l'interpretazione della meccanica classica», ossia come si possa intendere il mondo classico che noi vediamo – che è solo un'approssimazione alla realtà sottostante, di natura quantomeccanica – nei termini delle variabili proprie della meccanica quantistica.

Se insistiamo nel voler interpretare fenomeni quantomeccanici nei termini di concetti classici, ci imbatteremo inevitabilmente in fenomeni che sembrano paradossali o impossibili. Ed è giusto che sia così. La meccanica classica non può spiegare in modo appropriato fenomeni quantomeccanici, cosicché non c'è alcuna ragione per cui le descrizioni classiche debbano avere un senso.

Dopo questo avvertimento, descriverò tuttavia i problemi pertinenti nei termini della meccanica classica, perché questi sono gli unici strumenti linguistici di cui dispongo. Pur avendo i termini matematici appropriati per descrivere la meccanica quantistica, farò ricorso come tutti gli altri fisici solo a un'immagine mentale classica, poiché tutta la mia esperienza diretta è classica.

Come ho accennato nel capitolo 5, uno fra i caratteri più notevoli della meccanica quantistica è che, parlando di oggetti che presentano all'osservazione una determinata proprietà, non si può dire che possedessero tale proprietà l'istante prima dell'osservazione. Il processo di osservazione può modificare il carattere del sistema fisico considerato. La funzione d'onda quantomeccanica di un sistema descrive in modo completo la sua configurazione in un tempo qualsiasi, e questa funzione d'onda si evolve secondo leggi fisiche deterministiche. Quel che però fa sembrare le cose così folli è il fatto che questa funzione d'onda può abbracciare al tempo stesso due o più configurazioni reciprocamente esclusive.

Per esempio, se una particella ruota in senso orario, noi possiamo dire che ha spin «su». Se ruota in senso antiorario, diciamo che il suo spin è «giù». Ora, la funzione d'onda quantomeccanica di questa particella può includere una somma con

uguali probabilità di spin su e spin giù. Se si misura la direzione dello spin, si misurerà *o* spin su *o* spin giù. Una volta compiuta la misurazione, la funzione d'onda della particella includerà da allora solo la componente che la particella è risultata avere alla misurazione; se si misura spin su, si continuerà a misurare per questa particella questo stesso valore.

Questo quadro presenta però dei problemi. Ci si potrebbe domandare: come fa la particella ad avere sia spin su sia spin giù prima della misurazione? La risposta corretta è che non aveva né l'uno né l'altro. Prima della misurazione la configurazione del suo spin era indeterminata.

Il fatto che le funzioni d'onda della meccanica quantistica che descrivono gli oggetti non corrispondano a valori unici per le osservabili disturba particolarmente quando si comincia a pensare a oggetti viventi. C'è un famoso paradosso detto del «gatto di Schrödinger». (Erwin Schrödinger fu uno dei «giovani turchi» degli anni '20 di questo secolo che contribuirono a scoprire le leggi della meccanica quantistica. L'equazione che descrive l'evoluzione temporale della funzione d'onda quantomeccanica è nota come equazione di Schrödinger.) Immaginiamo una scatola, nella quale è rinchiuso un gatto. Dentro la scatola c'è una pistola carica puntata verso il gatto e collegata con una sostanza radioattiva. La sostanza ha una certa probabilità quantomeccanica di decadere in qualsiasi tempo dato. Quando decade, la pistola spara e uccide il gatto. La funzione d'onda che descrive il gatto, prima che io apra la scatola, è una sovrapposizione lineare di un gatto vivo e di un gatto morto? Questo modo di presentare le cose sembra assurdo.

Similmente la nostra coscienza è sempre unica, e non è mai indeterminata. L'atto di coscienza è una misurazione? In questo caso si potrebbe dire che in ogni istante c'è una probabilità quantomeccanica diversa da zero che si verifichino vari esiti diversi, e il nostro atto di coscienza determina quale esito sperimentiamo. La realtà ha quindi un numero infinito di rami. In ogni istante la nostra coscienza determina in quale ramo ci troviamo, ma a priori esiste un numero infinito di altre possibilità.

Questa interpretazione «a molti mondi» della meccanica quantistica – la quale dice che in qualche altro ramo della funzione d'onda quantomeccanica Stephen Hawking sta scrivendo questo libro e io sto scrivendo la premessa – è a quanto pare alla base della triste sorte del povero Worf. Questo è, in effetti, ciò che dice Data in quell'episodio. Quando la nave di Worf attraversa una «fessura quantistica nello spazio-tempo», emettendo simultaneamente un «impulso subspaziale», le barriere fra realtà quantiche «crollano», e Worf comincia a saltare da un ramo della funzione d'onda a un altro in tempi casuali, sperimentando numerose realtà quantistiche relative. Una cosa del genere non potrebbe ovviamente mai accadere, perché, una volta eseguita una misurazione, il sistema, compreso l'apparecchiatura di misurazione (in questo caso Worf), è cambiato. Una volta che Worf ha un'esperienza, non c'è modo di tornare indietro… o forse dovrei dire di saltare di lato. L'esperienza stessa è sufficiente a fissare la realtà. È la natura stessa della meccanica quantistica a richiederlo.

In quest'episodio si tocca un altro elemento della meccanica quantistica. L'equipaggio dell'*Enterprise* è a un certo punto in grado di verificare che Worf proviene da un'altra «realtà quantistica» sostenendo che la sua «firma quantica al livello atomico» differisce da qualsiasi altra cosa in questo mondo. Secondo Data questa firma è unica e non può cambiare in conseguenza di alcun processo fisico. Questo è chiaramente tecno-bla-bla-bla, ma ha tuttavia un rapporto con qualcosa di interessante nella meccanica quantistica. L'intero insieme di tutti gli stati possibili di un sistema si chiama spazio di Hilbert, dal famoso matematico tedesco David Hilbert che, fra le altre cose, fu molto vicino a sviluppare la relatività generale prima di Einstein. A volte sembra che lo spazio di Hilbert si scomponga in settori separati, detti «settori di superselezione». In questo caso nessun processo fisico può far muovere un sistema da un settore a un altro. Ogni settore è etichettato con una certa quantità: per esempio la carica elettrica totale del sistema. Volendo essere poetici, si potrebbe dire che questa quantità fornisce una «firma quantica» unica per questo settore, dato che tutte le operazioni quantiche locali preservano lo stesso settore, e il comportamento delle operazioni e delle osservabili a cui esse sono associate è determinato da questa quantità.

I diversi rami della funzione d'onda quantomeccanica di un sistema devono trovarsi però in un singolo settore di superselezione, perché ognuno di essi è in linea di principio fisicamente accessibile. Così, purtroppo per Worf, quand'anche egli violasse i dogmi fondamentali della meccanica quantistica saltando da un ramo a un altro, non potrebbe probabilmente esistere alcuna osservabile esterna a convalidare la sua storia.

Il punto essenziale dell'interpretazione dei molti mondi della meccanica quantistica (come pure di qualsiasi altra sua interpretazione) è che non si può mai sperimentare più di un mondo per volta. E per fortuna ci sono altre leggi della fisica che impedirebbero l'apparizione di milioni di *Enterprise* da realtà diverse, come accade alla fine dell'episodio. Basta, a impedirlo, la semplice conservazione dell'energia, un concetto puramente classico.

In effetti nella letteratura quantistica conosco un esempio in cui si suggerisce che si può accedere a rami diversi della funzione d'onda quantistica, argomentazione che è stata in gran parte accettata dal momento in cui apparve la prima edizione di questo libro, nel contesto di un possibile viaggio nel tempo. Alcuni hanno sostenuto che si possono aggirare i paradossi dei viaggi nel tempo che ho menzionato in precedenza se, quando si viaggia a ritroso nel tempo, si percorre un altro ramo della funzione d'onda quantistica. In tal modo, se con le proprie azioni si cambierà il futuro non sarà il futuro del ramo da

cui si è partiti, cosa che allevierà un bel po' di problemi. Per quanto tutto questo possa sembrare attraente io non ne sono affatto convinto, dal momento che questa proposta viola varie premesse fondamentali della meccanica quantistica, compresa la conservazione della probabilità. Trovo tuttavia divertente che, nella serie *Enterprise,* quel consumato viaggiatore nel tempo che è il membro dell'equipaggio Daniels usi costantemente vari strani dispositivi quantici associati al viaggio nel tempo. Quello che amo citare più spesso è il «discriminatore quantico», che aiuta a precisare come obiettivi le date e i tempi in cui recarsi. A quanto pare nel XXXI secolo la fisica ha fatto davvero grandi progressi e su ogni banco delle scuole medie superiori c'è un discriminatore quantico!

Su un piano molto più realistico, però, dopo la prima edizione di questo libro c'è stato un nuovo sviluppo che sfrutta veramente l'aspetto più strano della meccanica quantistica, ossia la tesi che oggetti che non sono osservati da nessuno possano esistere simultaneamente in un numero indeterminato di stati diversi. Questo nuovo sviluppo va sotto il nome di «computazione quantistica» e fu suggerito forse per la prima volta da Richard Feynman, ma è stato esplorato in profondità anche dai fisici dell'IBM, che furono così influenti nel promuovere il teletrasporto. Questo potrebbe a sua volta dare un contributo importante alla costruzione realistica a grande scala di computer quantistici, sempre che una cosa del genere possa mai diventare possibile.

L'idea alla base della computazione quantistica è relativamente semplice. I computer normali operano con bit, singole unità di memorizzazione logica che registrano o 1 o 0. Le operazioni logiche compiute con questi bit producono tutti i fenomeni di calcolo che governano il funzionamento del mondo moderno. I computer quantistici userebbero, invece dei bit, «qbit» o «qubit». Un esempio semplice di un qubit è la particella dotata di spin che ho descritto in precedenza. Classicamente si potrebbe chiamare 1 lo spin su e 0 lo spin giù. Come ho però già spiegato, prima di una qualsiasi osservazione la particella quantomeccanica ruota simultaneamente in tutte le direzioni. L'idea che è alla base della computazione quantistica è quella di usare questa proprietà per far sì che i singoli qubit siano impegnati simultaneamente in vari calcoli! Finché non si misurano i singoli qubit durante il processo computazionale (cosa che li costringerebbe ad adottare uno specifico stato su o giù) si potrebbe perciò immaginare un computer che fosse più veloce di vari ordini di grandezza rispetto ai normali computer elettronici, potendo eseguire un gran numero di calcoli paralleli. In effetti si è dimostrato che ciò è possibile in linea di principio e che un computer quantistico potrebbe eseguire in un tempo finito, realistico, alcune funzioni, come fattorizzare grandi numeri, che i computer normali potrebbero compiere in un tempo più lungo dell'età dell'universo. Anche se questa cosa può lasciarvi indifferenti, in realtà dovrebbe interessarvi una sua conseguenza. Oggi tutte le banche proteggono le informazioni dei loro clienti usando codici fondati sulla fattorizzazione di grandi numeri. Questi codici non possono essere violati dai computer oggi esistenti, ma se venissero realizzati computer quantistici, questo modo di conservazione sicura di informazione sarebbe bruscamente reso inutilizzabile.

Il grande problema con i computer quantistici, tuttavia, è quello di assicurare che tutte le parti mantengano la loro «coerenza quantistica», anche quando l'informazione passa all'interno di questi computer da un «qubit» a un altro. Ciò significa, proprio come per il teletrasporto quantistico, che il sistema deve rimanere isolato da ogni rumore e interazione esterni. Questa è una condizione difficile da realizzare, specialmente per sistemi di dimensioni macroscopiche, ma non ci rimane altro da fare che aspettare e vedere. Forse in *Star Trek* esistono computer quantistici, ed è per questo che il denaro non sembra importante per gran parte della Federazione. Dopo tutto, se i conti bancari e le transazioni economiche non possono essere sicuri, a che cosa serve il denaro?

Solitoni

Nell'episodio *L'onda di Soliton,* della serie *The Next Generation,* l'*Enterprise* assiste a un esperimento sviluppato dal dottor Ja'-Dor, del pianeta Bilana III. Qui un'«onda di solitoni», un fronte d'onda non disperdente di distorsione subspaziale, viene usata per la propulsione di una nave sperimentale a velocità curvatura senza bisogno del motore di curvatura. Il sistema richiede che al termine del viaggio ci sia un pianeta che fornisca un campo di diffusione per dissipare l'onda. L'esperimento termina quasi in un disastro, che viene scongiurato all'ultimo istante.

I solitoni non sono un'invenzione degli autori di *Star Trek.* Il termine è un'abbreviazione per «onde solitarie» e si riferisce a un fenomeno osservato in origine in onde nell'acqua da un ingegnere scozzese, John Scott Russell, nel 1834. Mentre stava eseguendo uno studio non retribuito del disegno delle chiatte per canali per la Union Canal Society di Edimburgo, notò qualcosa di peculiare. Per usare le sue stesse parole:

> Stavo osservando il moto di un grande battello che veniva trainato rapidamente lungo uno stretto canale da un paio

di cavalli, quando il battello improvvisamente si fermò: non altrettanto fece la massa d'acqua del canale che esso aveva messo in moto; essa si accumulò attorno alla prua del battello in uno stato di violenta agitazione, dopo di che mosse in avanti con grande velocità, assumendo la forma di una grande elevazione solitaria, un cumulo d'acqua arrotondato e ben definito che continuò il suo corso lungo il canale, apparentemente senza mutamento di forma o diminuzione di velocità. La seguii a cavallo e la superai mentre stava ancora procedendo a una velocità di otto o nove miglia all'ora [13-15 km/h], ancora conservando la sua figura originaria di circa trenta piedi di lunghezza [9 m] e un piede e mezzo [50 cm] in altezza. La sua altezza diminuì gradualmente e dopo un inseguimento di un miglio o due la persi nei meandri del canale. Questo, nel mese dell'agosto 1834, fu il mio primo casuale incontro con quel fenomeno bello e singolare che ho chiamato «l'onda di traslazione».[20]

Scott Russell coniò in seguito per descrivere questa meraviglia l'espressione «onda solitaria», che è persistita anche quando i solitoni sono apparsi in molti sottocampi diversi della fisica. Più in generale, i solitoni sono oggetti non dissipativi, classicamente estesi ma di grandezza finita, che possono propagarsi da un punto a un altro. Perciò il disastro che è al centro dell'episodio dell'*Onda di Soliton* non avrebbe potuto accadere. Innanzitutto, il solitone non «emetterebbe una grande quantità di interferenza radio». In tal caso dissiperebbe la sua energia. Per la stessa ragione non continuerebbe a guadagnare energia o a cambiare frequenza.

Le onde normali sono oggetti estesi che tendono a dissipare energia nel corso della loro propagazione. Le forze classiche, però – risultando da una forma di interazione attraverso lo spazio chiamata «campo» – conservano in generale intatti i solitoni, così che essi possono propagarsi senza cedere energia all'ambiente. Essendo soluzioni energetiche auto-contenute delle equazioni che descrivono il moto, si comportano, in linea di principio, proprio come oggetti fondamentali, come le particelle elementari. In certi modelli matematici dell'interazione forte che tiene assieme i quark, il protone potrebbe essere considerato in effetti come un solitone, nel qual caso noi tutti saremmo fatti di solitoni! Nella fisica delle particelle elementari sono stati proposti nuovi campi che potrebbero fondersi assieme in «stelle di solitoni»: oggetti grandi come una stella ma implicanti un singolo campo coerente. Oggetti del genere non sono mai stati osservati, ma potrebbero tuttavia esistere.

Quasar

Nell'episodio *The Pegasus* – in cui veniamo a conoscenza del Trattato di Algon, che impediva alla Federazione di usare dispositivi di occultamento – troviamo l'*Enterprise* di Picard che esplora il Quasar di Mecoria. In precedenza, nell'episodio *La Galileo,* della serie originale, avevamo appreso che l'*Enterprise* originaria aveva ordini permanenti di investigare questi oggetti ogni volta che le fosse capitato di imbattersi in uno di essi. Nessuna delle due navi si sarebbe però mai imbattuta in un quasar nelle sue peregrinazioni alla periferia della Galassia. Questo perché si ritiene che i quasar, gli oggetti di maggiore energia che si conoscano nell'universo (essi irraggiano energie paragonabili a quelle di intere galassie, e sono tuttavia così piccoli da non essere risolvibili dai telescopi), siano immensi buchi neri al centro di alcune galassie, e che – alla stregua di insaziabili parassiti – inghiottano letteralmente la massa centrale dei loro ospiti. Questo è l'unico meccanismo finora proposto che sia in grado di spiegare le energie osservate e le scale di grandezza dei quasar. La materia che cade in un buco nero irraggia una grande quantità di energia (mentre perde la sua energia potenziale gravitazionale). Se al centro di qualche galassia esistono buchi neri di un milione o un miliardo di masse solari, possono inghiottire interi sistemi stellari, che a loro volta irraggeranno l'energia necessaria per formare il segnale dei quasar. Perciò i quasar fanno spesso parte dei cosiddetti «nuclei galattici attivi». Per questa stessa ragione, non vorremmo incontrare uno di questi oggetti troppo da vicino. L'incontro ci sarebbe fatale.

Neutrini

I neutrini sono le particelle che preferisco in natura, ed è per questo motivo che me li sono lasciati per ultimi. Ho dedicato gran parte della mia ricerca a queste creature perché sappiamo molto poco di loro e tuttavia essi promettono di insegnarci molto sulla struttura fondamentale della materia e sulla natura dell'universo.

In diverse occasioni, in vari episodi di *Star Trek,* sulle astronavi si usano o misurano neutrini. Per esempio, letture elevate di neutrini sono intese di solito come segni del fatto che ci sono oggetti che percorrono il tunnel spaziale bajoriano.

Nell'episodio *Il nemico* apprendiamo anche che il visore di Geordi La Forge può scoprire neutrini, quando un fascio di neutrini viene inviato a localizzarlo per poterlo salvare da un pianeta inospitale. Ci imbattiamo in un «campo di neutrini» nell'episodio *Gioco di potere;* dove il campo interferisce temporaneamente col tentativo di teletrasportare a bordo dell'*Enterprise* qualche forma di vita criminale non corporea.

L'esistenza dei neutrini fu predetta per la prima volta in connessione con un rompicapo legato al decadimento dei neutroni. Mentre i neutroni sono stabili all'interno dei nuclei atomici, risulta dall'osservazione che i neutroni liberi decadono in protoni ed elettroni in un tempo medio di dieci minuti circa. La carica elettrica non crea alcun problema perché un neutrone è elettricamente neutro, mentre un protone ha una carica positiva e un elettrone ha una carica negativa uguale e opposta. La somma delle masse di un protone e di un elettrone è quasi pari alla massa di un neutrone, cosicché, in ogni caso, non rimane molta energia libera per produrre nel decadimento altre particelle dotate di massa.

A volte, però, durante il decadimento si osserva che il protone e l'elettrone si muovono nella stessa direzione. Questo fenomeno dovrebbe essere impossibile, poiché ogni particella emessa ha un suo *momentum.* Se il neutrone originario era in quiete aveva *momentum* zero, cosicché nel decadimento dovrebbe essere emessa anche qualche particella con *momentum* nella direzione opposta.

Una tale particella ipotetica fu proposta da Wolfgang Pauli negli anni '30, e fu chiamata «neutrino» da Enrico Fermi. Egli scelse questo nome perché la particella doveva essere elettricamente neutra, per non violare la conservazione della carica nel decadimento, e doveva avere almeno una massa molto piccola per poter essere prodotta con l'energia ancora disponibile dopo l'emissione di protone ed elettrone.

Poiché i neutrini sono elettricamente neutri, e non sono sensibili alla forza forte (che lega i quark e contribuisce alla coesione del nucleo), interagiscono solo molto debolmente con la materia normale. Ma poiché vengono prodotti nelle reazioni nucleari, come quelle che forniscono al Sole la sua energia, sono presenti dappertutto. Seicento miliardi di neutrini provenienti dal Sole attraversano ogni centimetro quadrato del nostro corpo ogni secondo di ogni giornata: un attacco incessante che ha ispirato addirittura una poesia di John Updike. Noi non sentiamo questo assedio dei neutrini perché essi passano attraverso il nostro corpo senza lasciare traccia. In media, questi neutrini solari potrebbero attraversare 10.000 anni-luce di materiale prima di interagire con qualche sua particella.

Se è così, potrebbe domandare qualcuno, come possiamo essere certi che i neutrini esistano altro che in teoria? Beh, la cosa più bella della meccanica quantistica è che essa fornisce probabilità. Ecco perché nel paragrafo precedente ho scritto «in media». Benché la maggior parte dei neutrini possano percorrere 10.000 anni-luce di materia senza interagire con alcuna particella, se si hanno abbastanza neutrini e un bersaglio abbastanza grande, si può essere fortunati da scoprire qualche interazione.

Questo principio fu usato per la prima volta nel 1956 da Frederick Reines e da Clyde Cowan, che misero un bersaglio di varie tonnellate accanto a un reattore nucleare e in effetti osservarono alcuni eventi. Questa scoperta empirica del neutrino (in realtà dell'antineutrino) ebbe luogo più di 20 anni dopo la formulazione dell'ipotesi della sua esistenza, e molto tempo dopo che la maggior parte dei fisici ne aveva accettato l'esistenza.

Oggi usiamo rivelatori molto più potenti. La prima osservazione dei neutrini solari fu compiuta negli anni '60 da Ray Davis e collaboratori, usando quasi 400.000 litri di detersivo liquido in un serbatoio sotterraneo nella miniera d'oro di Homestake nel South Dakota. Ogni giorno, in media, un neutrino proveniente dal Sole interagiva con un atomo di cloro, trasformandolo in un atomo di argo. Questi sperimentatori hanno avuto il grande merito di rivelare un'alchimia nucleare a un ritmo così basso. In realtà il tasso di interazioni misurato dal loro rivelatore e da tutti i successivi rivelatori di neutrini è diverso dal tasso predetto dalla teoria. Questo «rompicapo dei neutrini solari», come viene chiamato, potrebbe segnalare il bisogno di una nuova fisica fondamentale associata ai neutrini. Questa scoperta di Ray Davis all'inizio degli anni Sessanta fu onorata con l'assegnazione di un quarto del premio Nobel per la fisica per il 2002[21]. Il secondo quarto fu assegnato al giapponese Masatoshi Koshiba per avere diretto la costruzione del grandioso rivelatore di neutrini Kamiokande, in Giappone.

Il più grande rivelatore di neutrini nel mondo è in costruzione nella miniera di Kamiokande, in Giappone. Questo rivelatore, che contiene più di 30.000 tonnellate d'acqua, succederà al rivelatore da 5000 tonnellate che fu uno dei due rivelatori di neutrini che videro un pugno di neutrini provenienti dalla supernova del 1987 nella Grande Nube di Magellano, a più di 150.000 anni-luce di distanza!

Torniamo così là da dove abbiamo cominciato. I neutrini sono uno dei nuovi strumenti che i fisici stanno usando per aprire finestre sull'universo. Sfruttando ogni tipo possibile di rivelazione di particelle elementari, unitamente ai nostri rivelatori elettromagnetici convenzionali, potremmo scoprire i segreti della Galassia molto tempo prima di essere in grado di

esplorarla direttamente. Ovviamente, se fosse possibile inventare un rivelatore di neutrini delle dimensioni del visore di Geordi, sarebbe una cosa molto utile!

10. Impossibilità: il paese non scopribile

Geordi: "*È stato come se le leggi della fisica fossero uscite dalla finestra*".
Q: "*E perché non dovrebbero? In fondo sono così scomode!*"
In Una vera *Q.*

"*Io voglio che venga tentato anche l'impossibile.*"
Kirk a McCoy, in Al di là del tempo
"*Quello che lei descrive è... la non esistenza!*"
Kirk a Spock, in *L'alternativa*

QUALUNQUE fisico trekker ragionevole riconosce che *Star Trek* non va preso molto alla lettera. Tuttavia ci sono casi in cui, per qualche ragione, gli autori varcano il confine fra ciò che è semplicemente vago o poco plausibile e ciò che è del tutto impossibile. Benché la ricerca persino di oscuri errori tecnici in ogni episodio sia un passatempo universale dei trekker, non sono gli errori sottili quelli di cui fisici e studenti di fisica amano andare alla ricerca. Sono gli errori veramente grandi quelli di cui si parla di più a colazione e nelle pause per il caffè durante convegni e congressi.

Per equità devo dire che anche particolari di fisica, a volte di minore importanza, presentati correttamente in episodi della serie possono innescare discussioni il mattino dopo durante una pausa per il caffè. Ho per esempio un ricordo molto vivo del giorno in cui un mio ex allievo a Yale – Martin White, che attualmente è all'Università di Chicago – entrò nel mio ufficio dopo aver visto *Star Trek VI: Rotta verso l'ignoto*. Pensavo che avremmo parlato delle onde gravitazionali provenienti dai primissimi istanti dell'universo. Martin cominciò invece a esaltare una particolare scena del film, che durava in tutto 15 secondi. Due assassini muniti di casco salgono a bordo della nave del cancelliere Gorkon – la quale non era più in grado di difendersi, perché colpita da siluri fotonici lanciati apparentemente *dall'Enterprise*, ed era quindi in condizioni di gravità zero – e sparano a tutti quelli che incontrano, compreso lo stesso Gorkon. Ciò che impressionò Martin e, con mia sorpresa, vari altri studenti di fisica e membri del corpo docente con i quali discussi del film, fu il fatto che le gocce di sangue che volavano in giro per la nave avevano forma sferica. Sulla Terra tutte le gocce di liquido hanno forma allungata, come le lacrime, a causa della continua attrazione gravitazionale. In una regione priva di gravità, come la nave di Gorkon, persino le lacrime sarebbero sferiche. I fisici lo sanno, ma raramente hanno l'opportunità di vederlo. Così, con la precisione esibita in questo semplice particolare, gli addetti agli effetti speciali di *Star Trek* hanno reso felici una quantità di fisici. Non ci vuole poi molto…

Ma anche gli errori ci mantengono in attività. In realtà quello che potrebbe essere l'errore più memorabile di *Star Trek* menzionato da un fisico non implica per niente la fisica. Esso mi fu riferito dal fisico delle particelle (e divulgatore) Steven Weinberg, che vinse il premio Nobel per avere sviluppato quello che oggi è noto come il Modello standard delle interazioni delle particelle elementari. Poiché sapevo che ha l'abitudine di tenere la TV accesa mentre fa calcoli complicati, gli scrissi chiedendogli se avesse qualcosa di notevole da ricordare su *Star Trek*. Egli mi rispose che «l'errore principale fatto in *Star Trek* è quello di dividere ogni volta l'infinito dalla particella *to: To boldly go…!*»

Per lo più, però, sono gli errori di fisica ad attirare l'attenzione dei fisici. Io penso lo si debba al fatto che tali errori confermano la convinzione di molti fisici che la fisica sia molto lontana dalla cultura popolare, per non parlare del sentimento di superiorità che ci viene dalla possibilità di scherzare sugli eruditi sceneggiatori che scrivono le storie. È inimmaginabile che in un film importante si faccia parlare Napoleone in tedesco anziché in francese, o che si ambienti nell'Ottocento la firma della Dichiarazione d'Indipendenza americana. Perciò, quando un errore di fisica di grandezza paragonabile riesce a insinuarsi in quella che dovrebbe essere, dopo tutto, una serie orientata in senso scientìfico, ai fisici piace cogliere al volo l'occasione. Fui sorpreso nel constatare quanti miei colleghi eminenti – da Kip Thorne a Weinberg, a Sheldon Glashow, per non menzionare Stephen Hawking, forse il più famoso fra i fisici trekker – abbiano guardato la serie di *Star Trek*. Qui di seguito do un elenco dei miei errori preferiti, emersi in discussioni con questi e altri fisici o comunicatimi per posta elettronica da parte di trekker specialisti di discipline tecniche. Io mi sono sforzato qui di concentrarmi per lo più (ma non esclusivamente) su errori di «fisica terra-terra». Così, per esempio, non affronto problemi come: «Perché la luce delle stelle si diffonde ogni volta che si passa a una velocità curvatura?» e simili. Analogamente, ignorerò qui il tecno-bla-bla-bla: l'uso indiscriminato di un gergo scientifico e pseudoscientifico fatto in ogni episodio per dare l'impressione di una tecnologia del futuro. Infine, ho cercato per lo più di scegliere esempi di cui non mi sono occupato nei capitoli precedenti.

«Nello spazio nessuno può sentirti gridare»

La pubblicità del film *Alien* ha colto bene questo concetto, che in *Star Trek* viene di solito ignorato. Le onde acustiche *non* si propagano nello spazio vuoto! Eppure, quando una stazione spaziale orbitante attorno al pianeta Tanuga IV esplode, dal

nostro punto di vista a bordo dell'*Enterprise* noi udiamo l'esplosione, oltre a vederla. Peggio ancora, la udiamo *nello stesso tempo* in cui la vediamo. Quand'anche il suono potesse propagarsi nello spazio, cosa che non è, la velocità di un'onda di pressione come il suono è in generale di vari ordini di grandezza minore della velocità della luce. Basta andare a una partita di football per rendersi conto che vediamo le cose prima di udirle.

Un tipico esperimento di fisica nelle scuole superiori consiste nel mettere un campanello elettrico in una campana di vetro, da cui si può estrarre l'aria con una pompa. Una volta tolta l'aria, il suono del campanello scompare. Già nel Seicento si riconobbe che il suono aveva bisogno di un mezzo in cui propagarsi. Nel vuoto, come quello fatto all'interno della campana di vetro, non c'è nulla che possa farsi veicolo delle onde sonore, cosicché non udiamo il suono del campanello, pur vedendolo vibrare. Per l'esattezza, il suono è un'onda di pressione, o un disturbo, che si muove quando regioni in cui la pressione è maggiore o minore della pressione media si propagano in un mezzo. In assenza di un mezzo non c'è una pressione in cui possa propagarsi un disturbo. Per inciso, l'esempio della campana di vetro fu all'origine di un mistero di cui mi sono occupato in precedenza, e che fu molto importante nella storia della fisica. Infatti, mentre non si può sentire il campanello, *lo sì può ancora vedere*! Ora, se la luce è un qualche tipo d'onda, in quale mezzo si propaga che non venga estratto dalla campana insieme con l'aria? Questa fu una delle prime giustificazioni per postulare un mezzo chiamato etere.

Io non avevo mai prestato troppa attenzione al suono o alla sua mancanza nello spazio in *Star Trek*. Ma dopo che Steven Weinberg e vari altri mi ebbero detto di ricordare suoni associati a esplosioni in *Star Trek*, controllai l'episodio che avevo appena visto, *Punti di vista*, quello in cui esplode la stazione spaziale di Tanuga IV. Un bel botto! La stessa cosa potei riscontrare nell'episodio che vidi subito dopo (in cui una navetta che stava portando via dei cristalli di trilitio rubati all'*Enterprise* esplose con un forte boato nei pressi del pianeta Arkaria). Passai poi a esaminare il film di *Star Trek* più recente, *Generazioni*. Qui persino una bottiglia di champagne fa rumore quando si infrange contro l'*Enterprise* nella cerimonia del suo varo nello spazio.

Un mio collega fisico, Marc Srednicki, dell'Università della California a Santa Barbara, richiamò la mia attenzione su un errore molto più grave in un altro episodio, in cui le onde sonore sono usate come un'arma contro un'astronave in orbita. Come se questo strafalcione non fosse già abbastanza grave, vi si dice che le onde sonore raggiungono «18 alla 12ª [18^{12}] decibel». Quel che rende quest'esempio particolarmente divertente all'orecchio di un fisico è il fatto che la scala dei decibel è una scala logaritmica, come la scala Richter. Ciò significa che il numero dei decibel già rappresenta una potenza di 10 e che essi sono normalizzati in modo che 20 decibel siano un'intensità sonora 10 volte maggiore di 10 decibel, e 30 decibel a loro volta un'intensità ancora 10 volte maggiore. Così, 18 alla 12ª decibel sarebbe 10 elevato alla 18^{12}, ovvero un'intensità sonora 1 seguito da 11.568.313.814.300 zeri volte maggiore del rumore di un aereo a reazione!

Più veloce di un faser

Benché i viaggi a velocità curvatura, che utilizzano la curvatura dello spazio-tempo per viaggiare a velocità superiori a quella della luce, siano qualcosa con cui dobbiamo convivere in *Star Trek*, tale possibilità si fonda su tutte le sottigliezze della teoria della relatività e, come abbiamo visto, su nuove forme esotiche di materia. Ma per oggetti normali che fanno ogni tipo di cose quotidiane, la velocità della luce è e sarà sempre l'ultima barriera. A volte questo semplice fatto viene dimenticato. In un episodio cervellotico, *Velocità luce*, Kirk viene indotto con l'inganno dagli Scalosiani a bere una pozione che accelera di un fattore immenso le sue azioni fino a portarle al loro livello, così che egli possa sposare la loro regina Deela. Gli Scalosiani vivono un'esistenza iperaccelerata e non possono essere percepiti dall'equipaggio dell'*Enterprise*. Prima del matrimonio Kirk tenta dapprima di sparare a Deela col suo faser. Poiché però Deela ha una rapidità di movimenti incomparabile con la nostra, essa riesce a scansare il raggio. Ora, che cosa c'è di sbagliato in questa scena? La risposta è: tutto!

Alcuni trekker hanno notato che la rapidità di movimenti richiesta perché Deela fosse in grado di evitare il raggio faser, che si muove alla velocità della luce, renderebbe impossibile il resto dell'episodio. La velocità della luce è di circa 300 milioni di metri al secondo. Deela si trova a un metro circa da Kirk quando questi fa fuoco, cosicché il raggio faser dovrebbe impiegare per raggiungerla un trecentomilionesimo di secondo. Perché questo tempo possa essere per lei l'equivalente di un nostro secondo circa, l'orologio scalosiano dovrebbe essere accelerato rispetto al nostro di un fattore di 300 milioni. In questo caso, però, 300 milioni di secondi scalosiani passerebbero in un secondo nel tempo normale dell'*Enterprise*. Purtroppo 300 milioni di secondi equivalgono per noi a quasi 10 anni.

Va bene, perdoniamo quest'errore agli autori di *Star Trek*. C'è però un problema molto maggiore, che è impossibile da risolvere e che è stato rilevato da vari fisici che conosco. I faser, ci viene detto in *Star Trek*, sono armi a energia diretta; perciò il raggio faser si propagherà alla velocità della luce. Mi spiace, ma non c'è modo di evitare questa grave difficoltà. Se

i faser sono energia pura, e non fasci di particelle, come dice il manuale tecnico di *Star Trek*, devono muoversi alla velocità della luce. Per quanto rapidamente possiamo muoverci, e anche nell'ipotesi di essere accelerati di un fattore di 300 milioni, non potremo mai evitare di essere colpiti da un raggio faser in arrivo. Perché? Perché per sapere che sta arrivando dobbiamo prima vedere il nostro avversario che spara. Ma la luce che ci permette di vedere che il nostro avversario ci sta sparando viaggia con la stessa velocità del raggio faser. Per dirla nel modo più semplice, non possiamo sapere che il raggio faser ci colpirà se non nel momento stesso in cui ci colpisce! Finché i raggi faser sono raggi di energia non c'è modo di sottrarsi a questa difficoltà. Un problema simile implicante il tentativo di evitare il raggio faser si trova nell'episodio *The Phage* della serie *Voyager*.

A volte, però, sono i critici di *Star Trek* a sbagliare. Qualcuno mi disse di prender nota di un errore nel film *Generazioni*, in cui viene fatta sparire una stella che illumina un pianeta, e nello stesso istante il pianeta si oscura. Ciò è ovviamente impossibile, perché la luce impiega un tempo finito per coprire la distanza fra la stella e il pianeta. Così, quando io spengo la luce di una stella, per un po' di tempo il pianeta non lo saprà. In *Generazioni*, però, l'intero processo è visto dalla superficie del pianeta. In questa situazione, perciò, la superficie del pianeta dovrebbe effettivamente oscurarsi nello stesso istante in cui si vede la stella implodere. Questo perché sia l'informazione che la stella è implosa sia l'assenza di luce arriveranno sul pianeta nello stesso tempo. Entrambe queste informazioni saranno differite, ma arriveranno entrambe nello stesso tempo!

Benché gli autori abbiano imbroccato questo fatto, hanno però commesso l'errore di contrarre il differimento a un tempo irragionevolmente breve. Essi ci dicono che la sonda che distruggerà la stella impiegherà solo 11 secondi a raggiungerla dopo il lancio dalla superficie del pianeta. La sonda viaggia a una velocità inferiore a quella della luce, cosa di cui possiamo essere certi dato che coloro che si trovano sulla superficie del pianeta vedono l'inizio dell'implosione della stella dopo un tempo inferiore al doppio del tempo trascorso dal lancio della sonda, cosa che indica che la luce deve avere impiegato meno di 11 secondi per compiere il viaggio di ritorno. La Terra, come ho già notato, si trova a 8 minuti-luce dal Sole. Se il Sole esplodesse in questo momento, noi ce ne accorgeremmo solo fra 8 minuti. Io trovo difficile credere che un pianeta della Classe M in *Generazioni* potesse esistere a una distanza di 10 secondi-luce da una stella che brucia idrogeno come il nostro Sole. Questa distanza è meno di 5 volte maggiore del raggio equatoriale del Sole: troppo piccola per permettere una permanenza gradevole sul pianeta.

Non può esserci una crepa nell'orizzonte degli eventi

Pur avendo detto che non mi soffermerò sul tecno-bla-bla-bla, non posso fare a meno di menzionare che la serie *Voyager*, in questo campo, vince di parecchie lunghezze. Ogni elemento del gergo della fisica moderna viene gettato a piene mani nella serie mentre il *Voyager* cerca di trovare la via del ritorno, viaggiando nel tempo con la regolarità di un treno di pendolari. I termini di fisica, però, di solito *significano* qualcosa, cosicché, quando li si usa come elementi di una storia, ogni tanto li si deve usare a ragion veduta. Nel capitolo 3 ho menzionato che la «crepa» nell'orizzonte degli eventi che salva la giornata per il *Voyager* (nel debole episodio *The Phage*) suona particolarmente balzana ai fisici. Una «crepa» in un orizzonte degli eventi è come un cerchio a cui sia stata tolta un'estremità, o come, per un donna, essere un po' gravida. Non significa niente. L'orizzonte degli eventi attorno a un buco nero non è un'entità fisica, ma piuttosto la delimitazione di uno spazio all'interno del quale tutte le traiettorie rimangono all'interno del buco. È una proprietà dello spazio curvo che la traiettoria di qualsiasi cosa, compresa la luce, si incurverà verso il buco una volta che ci si trovi all'interno di un certo raggio. L'orizzonte degli eventi, o esiste – nel quale caso esiste un buco nero – o non esiste. Non c'è, fra queste due possibilità, un terreno intermedio abbastanza grande da farci passare un ago, e tanto meno il *Voyager*.

Quant'è solido il medico?

Devo ammettere che la novità tecnologica che mi piace di più nella serie *Voyager* è il medico olografico. C'è una scena meravigliosa in cui un paziente domanda al medico come può essere solido, se è solo un ologramma. Buona domanda. Il medico risponde spegnendo un «fascio di confinamento magnetico» per mostrare che, senza di esso, sarebbe altrettanto incorporeo quanto un miraggio. Poi ordina di riattivare il raggio, cosa che gli permette di intervenire con energia sul povero paziente. È una gran cosa, ma purtroppo è anche impossibile. Come abbiamo visto nel capitolo 6, il confinamento magnetico fa meraviglie per le particelle cariche, le quali sentono in un campo magnetico costante una forza che le fa muovere in orbite circolari. La luce, però, non ha cariche elettriche e non sente alcuna forza in un campo magnetico. Poiché un ologramma non è altro che un'immagine luminosa, ciò vale anche per il medico.

Sono più solide le mani o le natiche? Ovvero, fuori fase o no?

Star Trek ha commesso a volte quello che io chiamo il famigerato errore di *Ghost*. Mi riferisco al recente film con questo titolo in cui il protagonista, un fantasma, cammina attraverso i muri e non riesce a sollevare oggetti perché la sua mano passa attraverso di essi. Miracolosamente, però, quando si siede su una sedia o su un divano le sue natiche riescono a reggerlo. Similmente, il suolo sembra abbastanza solido sotto i suoi piedi. Nell'ultimo capitolo ho descritto come Geordi La Forge e Ro Laren sono stati messi «fuori fase» con la normale materia da un «generatore interfasico» romulano. Essi scoprirono con loro sorpresa di essere invisibili e di poter camminare attraverso le persone e attraverso i muri, inducendo almeno Ro a credere di essere morta (forse in giovinezza aveva visto una riproposta di *Ghost* in qualche vecchio cinema). Eppure Geordi e Ro riuscivano a stare in piedi sul pavimento e a sedersi tranquillamente su sedie. La materia è materia, e sedie e pavimenti non sono diverse dai muri; a quanto so, inoltre, le natiche non sono né più né meno solide delle mani.

Per inciso, a questo particolare episodio è associato un altro errore fatale che distrugge la coerenza anche di vari altri episodi di *Star Trek*. In fisica due oggetti che interagiscono entrambi con qualche altra cosa sono sempre in grado di interagire fra loro. Questa situazione ci riconduce direttamente alla prima legge del moto di Newton. Se io esercito una forza su di te, tu eserciti una forza uguale e opposta su di me. Così, se Geordi e Ro erano in grado di osservare l'*Enterprise* dalla loro nuova «fase», potevano evidentemente interagire con la luce, che è un'onda elettromagnetica. In virtù della legge di Newton, se non d'altro, essi avrebbero dovuto essere visibili a loro volta. Il vetro è invisibile proprio perché non assorbe luce visibile. Per vedere – ossia per percepire la luce – la si deve assorbire. Assorbendo luce la si disturba, ma in questo modo si dev'essere visibili a qualcun altro. Lo stesso vale per gli invisibili insetti interfase che invasero l'*Enterprise* fissandosi al corpo dei membri dell'equipaggio, nell'episodio *Phantasms*, della serie *The Next Generation*. La forza che permette loro di poggiare su normale materia senza passare attraverso di essa non è altro che l'elettromagnetismo: la repulsione elettrostatica fra le particelle cariche che compongono gli atomi di un corpo e gli atomi di un altro corpo. Se si reagisce elettromagneticamente, si fa parte del nostro mondo. Non esiste uno spuntino gratuito.

In verità, dopo l'uscita della prima edizione di questo libro, mentre stavo discutendo su questo errore in una pubblica conferenza, un bambino di cinque anni (di cui vorrei conoscere il nome, dato che oggi potrebbe studiare fisica all'università!), mi rivolse una domanda molto intelligente. Se Geordi La Forge e Ro erano fuori fase, come facevano a respirare? L'aria non dovrebbe semplicemente passare attraverso il loro corpo? Una buona domanda, alla quale non avevo pensato, che mi veniva rivolta da un bambino di cinque anni!

Gettare il bambino con l'acqua sporca

Nell'episodio *Complotto a bordo*, della serie *The Next Generation*, l'*Enterprise* «attracca» al Remmler Array, nella base stellare arkariana, per essere «ripulita dai barioni». Pare che queste particelle si accumulino sulle strutture esterne dell'astronave in conseguenza di viaggi a lungo termine a velocità curvatura, e debbano essere eliminate. Durante le operazioni di pulizia l'equipaggio dev'essere evacuato, perché il raggio che elimina i barioni è letale per i tessuti viventi. E sarebbe senza dubbio così! Gli unici barioni stabili sono 1) i protoni e 2) i neutroni nei nuclei atomici. Dal momento che queste particelle compongono tutto ciò che vediamo, se si ripulisse l'*Enterprise* da queste particelle non resterebbe molto per episodi futuri.

Quanto può essere freddo il freddo?

L'errore preferito dal mio collega e appassionato di *Star Trek* Chuck Rosenblatt è il congelamento di un oggetto alla temperatura di -295°C. Questa è una scoperta molto interessante perché, sulla scala Celsius, lo zero assoluto è a -273°. Lo zero assoluto, come implica il nome, è la temperatura più bassa che un qualsiasi oggetto possa raggiungere, essendo definita come la temperatura alla quale cessano tutti i moti, vibrazioni e rotazioni, molecolari e atomici. Pur essendo impossibile raggiungere questa temperatura teorica di zero gradi, si è riusciti a raffreddare taluni sistemi atomici fino a meno di un milionesimo di grado sopra lo zero (e mentre sto scrivendo è stata appena raggiunta in un esperimento la temperatura di 2 miliardesimi di grado sopra lo zero assoluto). Poiché la temperatura è associata al moto molecolare e atomico, non si potrà mai scendere al di sotto della temperatura corrispondente all'assenza di moto; perciò fra 400 anni lo zero assoluto sarà ancora assoluto.

Ho visto la luce!

Sono un po' in imbarazzo nel dire che questo ovvio errore, che avrei dovuto scoprire io stesso, mi è stato in realtà segnalato da uno studente del primo anno di fisica, Ryan Smith, quando stavo facendo lezione alla sua classe e accennai al fatto che stavo scrivendo questo libro. Ogni volta che l'*Enterprise* spara un faser, lo vediamo. Ma questo fatto è chiaramente impossibile, a meno che il faser non emetta luce in tutte le direzioni. La luce non è visibile se non viene riflessa da qualcosa. Se sei mai stato a una lezione tenuta con l'aiuto di un puntatore laser – in generale sono laser rossi all'elio-neon – ricorderai che si vede solo il punto in cui il raggio colpisce lo schermo, mentre non si vede niente fra il puntatore e lo schermo. L'unico modo per rendere visibile l'intero raggio è quello di sollevare un polverone nella sala, per esempio sbattendo insieme cancellini o facendo qualcosa di simile. (Qualche volta dovreste provarci; lo spettacolo di luce è davvero impressionante.) Gli spettacoli con luce laser vengono prodotti facendo riflettere la luce laser su fumo o acqua. Perciò, a meno che lo spazio vuoto non sia particolarmente polveroso, non dovremmo vedere il raggio faser se non là dove colpisce il bersaglio.

Gli astronomi diventano pignoli

Forse non dovremmo sorprenderci nel constatare che gli errori di fisica che varie persone trovano in *Star Trek* sono spesso strettamente connessi alle proprie aree di interesse. Nei sondaggi informali che ho fatto per trovare esempi in proposito, ho ottenuto invariabilmente risposte che presentavano una correlazione con le occupazioni specifiche delle persone che si prestavano a fornirmi informazioni. Ricevetti, in particolare, varie risposte per posta elettronica da trekker astronomi che reagivano a vari sottili errori di *Star Trek*. Uno studente di astronomia dichiarò erroneo un grande sforzo degli autori di *Star Trek* per usare vere informazioni di astronomia. La forma di vita che si nutre di energia in *Il figlio della Galassia* è una creatura spaziale neonata che scambia l'*Enterprise* per la propria madre e comincia ad attingerne energia. La Forge trova appena in tempo un modo per indurre la giovane creatura a staccarsi. La creatura era attratta dall'emissione dell'*Enterprise*, alla lunghezza d'onda di 21 ck. Cambiando la frequenza dell'emissione, La Forge fa «inacidire il latte», e la creatura si stacca. Ciò che rende quest'episodio interessante, e al tempo stesso scorretto, è il fatto che gli autori raccolsero dall'astronomia un fatto da me menzionato nel capitolo 8, ossia che la radiazione di 21 cm è una frequenza universale emessa dall'idrogeno, frequenza che viene usata dagli astronomi per disegnare carte della distribuzione del gas interstellare. Gli autori interpretarono però erroneamente tale nozione nel senso che ogni cosa nello spazio irraggi a 21 cm, compresa l'*Enterprise*. In realtà la transizione atomica responsabile di questa radiazione nell'idrogeno è estremamente rara, cosicché un particolare atomo di idrogeno nello spazio interstellare potrebbe produrre tale radiazione in media solo una volta ogni 400 anni. Poiché però l'idrogeno è l'elemento di gran lunga più abbondante nell'universo, il segnale di 21 cm è abbastanza intenso da poter essere captato dalla Terra. Così, in questo caso, io avrei dato un 8 agli autori per il loro sforzo e lo avrei ridotto a 6-per il loro errore di interpretazione, ma si sa che io sono un po' di manica larga.

Uno scienziato della NASA mi indicò un errore che mi era sfuggito e che si suppone debba essere riconosciuto immediatamente da uno che lavora per l'ente aerospaziale. Per le astronavi è in generale un procedimento standard quello di entrare in un'orbita sincrona attorno a un pianeta, così che il periodo orbitale della nave sia uguale a quello della rotazione del pianeta stesso. In questo modo la nave rimarrebbe sulla verticale di un determinato punto sulla superficie del pianeta, come i satelliti meteorologici geostazionari attorno alla Terra rimangono al di sopra di un punto preciso della superficie terrestre. Tuttavia, quando ci viene fatta vedere l'*Enterprise* in orbita attorno a qualche pianeta, la si vede di solito in movimento contro lo sfondo della superficie del pianeta. In effetti, se l'astronave non si trovasse in un'orbita sincrona, avrebbe considerevoli difficoltà col teletrasporto.

Alcuni nuovi contributi a questo libro forniti dopo la prima edizione

Ovviamente negli anni trascorsi dopo la prima edizione di questo libro mi furono segnalati da varie persone una quantità di nuovi errori più o meno gravi compiuti nelle serie e nei film prodotti successivamente, ma anche errori compiuti nelle serie precedenti che mi erano sfuggiti. Io non posso rendere giustizia qui a tutte queste persone, cosicché mi occuperò soltanto di quattro errori fra i meno ovvi che mi sono stati segnalati da varie fonti: un fisico, un appassionato – anzi un'appassionata – di *Star Trek*, un redattore *trekker* e un membro dell'equipaggio dell'*Enterprise*.

IL FISICO. Il mio collega Chuck Rosenblatt mi parlò di un errore divertente nella serie originale, nel quale Kirk ordina di aumentare la velocità della nave di «uno alla ventesima potenza!» Uno alla ventesima potenza! Cioè 1 × 1 × 1 × 1 × … per 20 volte, che però dà sempre 1.

L'APPASSIONATA DI STAR TREK. Jeana Park è un'appassionata dell'epopea di *Star Trek* che mi ha scritto sottoponendomi molte domande sulle varie serie, e in particolare sulla serie *Enterprise*. Mi ha fatto notare un errore di fisica molto semplice (il mio genere preferito) implicante un'astronave mercantile terrestre attaccata da pirati nausicaani. All'inizio dell'episodio il capitano e il primo ufficiale stanno giocando con una palla da calcio nella stiva del mercantile. Impartiscono solo lievi spinte alla palla, la quale si muove lentamente avanti e indietro fra loro, indicando che si trovano in un ambiente quasi a gravità zero. Camminano però in un modo assolutamente normale. Ma la gravità influisce ugualmente su tutte le cose, cosicché, se essi non hanno ai piedi degli stivali gravitazionali, come gli assassini del film *Star Trek VI: Rotta verso l'ignoto*, dovrebbero restare sospesi in aria come la palla.

IL REDATTORE. Il redattore di questa nuova edizione della *Fisica di Star Trek*, William Frucht, mi ha ricordato un errore della serie *Enterprise* su cui mi aveva già chiesto ragguagli la signora Park. Esso concerneva la visita degli uomini dell'astronave a un pianeta solitario, ossia un pianeta sfuggito al suo sistema solare, e che non aveva quindi un astro centrale. Non si riesce a immaginare come il pianeta potesse essere caldo e ospitare forme di vita in assenza di una stella; forse poteva essere riscaldato dal decadimento di grandi quantità di materiali radioattivi al suo interno, e il processo di allontanamento dal suo astro centrale poteva essere stato abbastanza dolce da non fargli perdere l'atmosfera. Gran parte dell'azione ha luogo però in una foresta lussureggiante con molti alberi, Ma dove non ci sono stelle non c'è luce. Dove non c'è luce non ci sono fotoni, e senza fotoni non c'è fotosintesi, e quindi nemmeno alberi con foglie verdi.

IL MEMBRO DELL'EQUIPAGGIO. In uno degli eventi organizzati per celebrare il quarantesimo anniversario di *Star Trek*, trascorsi parte di una piacevole serata a bere col dottor Phlox (John Billingsley), il quale stava cercando di spiegarmi lo strano rituale di accoppiamento dei Denobulani, la specie umanoide rappresentata dal suo personaggio, la quale appare per la prima volta nella serie *Enterprise*. Ogni donna Denobulana ha tre mariti, e ogni uomo ha tre mogli. Questo è bello, per esempio, se a tre donne è permesso di essere mogli degli stessi due uomini. In caso contrario, come pensava che fosse Billingsley (che dovrebbe essere ben informato!), si sviluppava un inferno logistico che noi cercammo di sbrogliare, in verità senza molto successo, mentre continuavamo a bere. Se ogni donna deve trovare tre uomini diversi, ognuno dei quali dev'essere sposato con altre due donne, il numero delle interrelazioni cresce rapidamente, e in effetti non si può mai trovare una situazione chiusa con un numero di persone finito. Ovviamente, poiché i Denobulani possono avere rapporti intimi con tutte le persone che scelgono, le possibilità sembrano probabilmente infinite in ogni caso.

Quei dannati neutrini

Penso di non poter fare a meno di riprendere l'argomento dei neutrini. E dal momento che in questo libro ho piuttosto sorvolato su *Deep Space Nine*, è forse giusto concludere con uno strafalcione tratto da questa serie, che mi è stato riferito da David Brahm, un altro fisico trekker. Pare che Quark si sia impadronito di una macchina che altera le leggi della probabilità nelle sue vicinanze. Si può immaginare quanto sarebbe utile questo fatto ai suoi tavoli da gioco, fornendogli il tipo di ingiusto vantaggio a cui un Ferengi non potrebbe resistere. Il suo inganno viene però scoperto da Dax, che sta analizzando ad altri fini il flusso di neutrini che attraversano la stazione spaziale. Con sua sorpresa, Dax scopre che tutti i neutrini che passano sono sinistrorsi, ossia ruotano in una direzione precisa relativamente al loro moto. Ci dev'essere un errore. Sembrano mancare i neutrini con spin destrorso!

Purtroppo, fra tutti i fenomeni che gli autori di *Star Trek* potevano scegliere per scoprire la disonestà di Quark, riuscirono a trovare un fenomeno che è invece proprio così in natura. A quanto sappiamo, infatti, i neutrini hanno solo spin sinistrorso! Essi sono le uniche particelle note in natura che a quanto pare possano esistere in un solo stato di spin. Se l'analisi di Dax avesse fornito questa informazione, essa avrebbe avuto ogni ragione di credere che lo spin dei neutrini era proprio come doveva essere.

Ciò che rende quest'esempio così affascinante ai miei occhi è proprio ciò che rende così interessante la fisica di *Star Trek:* a volte la verità è più strana dell'immaginazione.

Epilogo

TANTO basti per gli strafalcioni e per la fisica. Se mi sono lasciato sfuggire qualcuno fra gli errori o gli argomenti di fisica che vi sembrano più importanti o significativi, mandate i vostri suggerimenti al mio editore. Se ce ne saranno abbastanza, anche noi, come *Star Trek,* potremo progettare un seguito. Ho già trovato il titolo: *La fisica di Star Trek II: L'ira di Krauss.* Io spero che ora sia chiaro che era solo uno scherzo, e che *La fisica di Star Trek* non avrà alcun seguito. Ovviamente, se l'epopea di *Star Trek* continuerà, io potrei tentare di mantenere aggiornati sia la fisica sia i riferimenti alle serie…, almeno finché i miei editori riusciranno a convincermi a preparare nuove edizioni.

Se ho chiuso il libro con un capitolo sugli errori di fisica non è stato per sottoporre a critiche, che sarebbero in qualche misura ingiuste, gli autori di *Star Trek,* bensì per chiarire che ci sono molti modi per godere della serie. Finché *Star Trek* continuerà a circolare nell'etere, sono certo che sempre nuovi errori in fisica daranno ai trekker di ogni specie, dagli studenti delle scuole superiori ai professori universitari, qualche argomento di cui parlare la mattina dopo. La serie offre inoltre agli autori e ai registi una sfida a cercare di tenere il passo col mondo in continua espansione della fisica.

Vorrei quindi chiudere il libro come l'ho cominciato, non con gli errori ma con le possibilità. La nostra cultura è stata senza dubbio plasmata dai miracoli della fisica moderna – e qui desidero includere fra i fisici moderni Galileo e Newton – come da qualsiasi altra impresa intellettuale umana. E benché nel nostro tempo sia purtroppo diffusa l'idea erronea che la scienza sia in qualche misura separata dalla cultura, essa è in realtà una parte vitale di ciò che compone la nostra civiltà. Le nostre esplorazioni dell'universo rappresentano alcune delle scoperte più notevoli dell'intelletto umano, ed è un peccato che non siano condivise da un pubblico così grande come quello che gode delle ispirazioni della grande letteratura, della pittura o della musica.

Sottolineando il ruolo potenziale della scienza nello sviluppo della specie umana, *Star Trek* illustra in modi imprevedibili la potente connessione fra scienza e cultura. Pur avendo a volte sostenuto che la scienza del XXI secolo potrebbe avere ben poca somiglianza con le fantasie degli autori di *Star Trek,* mi attendo tuttavia che tale scienza possa essere ancora più notevole. Sono convinto, in ogni caso, che la fisica di oggi e di domani determinerà sicuramente il carattere del nostro futuro, così come la fisica di Newton e di Galileo colora la nostra esistenza presente. Penso di avere scelto la carriera scientifica anche perché sono stato sempre convinto delle possibilità della nostra specie di continuare a scoprire meraviglie nascoste nell'universo. E questo è, dopo tutto, lo spirito che anima la serie di *Star Trek.* È forse doveroso lasciare l'ultima parola a Gene Roddenberry. Come egli disse nel XX anniversario della serie di *Star Trek,* un anno prima della sua morte: «La specie umana è un organismo notevole, con un grande potenziale, e io spero che *Star Trek* abbia aiutato a mostrarci che cosa possiamo diventare se crediamo in noi stessi e nelle nostre capacità».

Ringraziamenti

Ho un grande debito di riconoscenza verso molte persone che hanno contribuito a rendere possibile questo libro. Innanzitutto sono grato ai colleghi della comunità di fisica che hanno sempre risposto alle mie richieste di aiuto. Ringrazio in particolare Stephen Hawking per avere prontamente accettato di scrivere la premessa, e Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Kip Thorne per avermi gentilmente comunicato i loro ricordi di *Star Trek.* John People, direttore del Fermi National Accelerator Laboratory, ha messo a mia disposizione alcuni membri del suo personale per aiutarmi a riferire sulla produzione e accumulazione di antimateria al Fermilab. Ringrazio particolarmente Judy Jackson, dell'ufficio pubbliche relazioni del Fermilab, per l'aiuto e le fotografie, e il mio collega alla Case Western Reserve University Cyrus Taylor, che sta attualmente eseguendo esperimenti al Fermilab, per aver risposto a varie domande tecniche. Paul Horowitz, dell'Università di Harvard, ha risposto alla mia richiesta di informazioni sui programmi SETI e META da lui diretti, inviandomi da un giorno all'altro una quantità di preziose informazioni sulla ricerca di vita intelligente extraterrestre e di fotografie dei progetti. George Smoot mi ha fornito la mirabile fotografia della nostra Galassia eseguita dal COBE, e Philip Taylor mi ha procurato un'indicazione bibliografica sui solitoni.

Vari fisici trekker mi hanno offerto generosamente le loro osservazioni e riflessioni sulla fisica di *Star Trek.* In particolare, sono grato a Mark Srednicki, Martin White, Chuck Rosenblatt e David Brahm per avermi indicato esempi utili tratti dalla serie. Vorrei ringraziare anche i trekker che hanno risposto alla richiesta da me inviata per E-mail alle bacheche elettroniche di *Star Trek* concernente i fenomeni di fisica trattati nella serie e gli strafalcioni di fisica secondo loro più significativi; e in particolare Scott Speck, «Westy» alla NASA, TJ. Goldstein, Denys Proteau e J. Dilday, per avermi o confermato nelle mie scelte o suggerito altri esempi utili. Vorrei anche ringraziare vari studenti alla Case Western Reserve University per avermi fornito informazioni, specialmente Ryan Smith.

Altri trekker mi hanno fornito importanti contributi. Vorrei esprimere la mia riconoscenza ad Anna Fortunato per aver letto e commentato la prima stesura del manoscritto e avermi dato molti suggerimenti utili. Anche Mark Landau, alla Harper Collins, mi ha fornito preziose indicazioni. Jeffrey Robbins, a quel tempo redattore alla Oxford University Press, ha avuto la cortesia di indicarmi un importante riferimento bibliografico sul motore di curvatura. Mio zio Herb Title, avido trekker, ha letto tutto il manoscritto, così come il fisico mio ricercatore aggiunto Peter Kernan. Entrambi mi hanno largito commenti utili. Anche mia moglie, Rate, mi ha dato suggerimenti per varie parti del manoscritto.

Ho un debito con Greg Sweeney e con Janelle Reberle per avermi prestato la loro collezione completa indicizzata di videocassette di *Star Trek,* che ho avuto a mia disposizione per quattro mesi durante la stesura del libro. Questi materiali sono stati essenziali per me e li ho usati costantemente per controllare informazioni e verificare trame. Li ringrazio per avermi affidato la loro collezione.

Vorrei esprimere un ringraziamento particolare al mio editor alla Basic Books, Susan Rabiner, senza la quale questo progetto non sarebbe mai andato in porto. È stata lei a convincermi infine ad affrontarlo e ad adoperarsi fattivamente per promuovere il progetto alla Basic Books e alla Harper Collins. Devo ringraziare a questo proposito anche Rermit Hummel, presidente della Basic Books, per il suo sostegno e il suo entusiasmo. La forma finale di questo libro dipende in modo cruciale anche dal sapere e dalle intuizioni della mia redattrice Sara Lippincott. Le molte ore che trascorremmo alla macchina per fax e al telefono si riflettono, secondo me, in un manoscritto sostanzialmente migliorato.

Vorrei ringraziare, infine, il decano, il corpo docente, il personale e gli studenti del College of Arts and Sciences e del Dipartimento di fisica della Case Western Reserve University per il loro sostegno e, anche troppo spesso, per la loro indulgenza quando stavo lavorando a quest'opera. L'atmosfera di solidarietà e di interesse che essi contribuirono a creare mi diede forza nei momenti in cui ne ebbi veramente bisogno.

Come sempre, la mia famiglia ha sostenuto i miei sforzi in tutti i modi possibili. Molte volte Rate e mia figlia Lilly acconsentirono addirittura a vedere episodi di *Star Trek* fino a sera tardi, mentre avrebbero preferito andare a dormire.

Infine, per l'edizione riveduta e aggiornata del libro, vorrei ringraziare tutti coloro che mi hanno scritto negli anni scorsi, rivolgendomi domande, offrendomi suggerimenti e formulando lagnanze; fra di essi c'è anche un certo numero di nuovi premi Nobel, come Gerard (Gerardus) 't Hooft (premio Nobel nel 1999 per le sue ricerche sulle interazioni elettrodeboli), che mi hanno motivato e stimolato a continuare a riflettere sul modo in cui l'universo reale e l'universo di *Star Trek* possono intersecarsi. Spero che voi possiate vedere un po' della vostra curiosità riflettersi nel nuovo materiale che troverete qui.

Lawrence M. Krauss

Il traduttore vorrebbe a sua volta ringraziare il figlio Silvio Sosio per l'aiuto che gli ha dato per documentarsi su episodi di *Star Trek* che non conosceva, e pensa di far cosa grata ai lettori segnalando una documentazione sugli episodi delle sette stagioni di *Star Trek: The Next Generation,* completa di tìtoli originali e italiani, date della prima trasmissione USA, regia,

musica, cast regolare e guest star, trama ed eventuali curiosità, a cura di Luigi Rosa e Silvio Sosio, disponibile su INTERNET, all'interno della rivista *Delos,* all'indirizzo www.fantascienza.com/delos/delosl8.

Il traduttore pensa inoltre di far cosa grata ai lettori rimandandoli all'indirizzo http://www.stic.it/, il sito dello STIC (Star Trek Italian Club). Qui troveranno una grandissima quantità di informazioni sul club, la sua storia, le sue iniziative e attività, e la rivista *Inside Star Trek,* che viene spedita ogni due mesi ai soci. Il sito comprende sezioni dedicate alle varie serie TV, dalla serie Classica a *Enterprise,* compresa anche la seiie Animata, con la guida a tutti gli episodi, schede sui personaggi principali, videocassette, DVD e libri, colonne sonore e informazioni sulle trasmissioni televisive. Qualcosa di simile si trova anche per tutti i film.

La redazione vorrebbe infine ringraziare Franco La Polla (autore di *Star Trek. Foto di gruppo con astronave,* PuntoZero, Bologna, 1995, un libro da non perdere) per la disponibilità dimostrata.

)

Per esempio Michael White, *La scienza degli X-Files,* trad. it. di I. Blume C. Capararo, Rizzoli, Milano 1996. ↩

)

Nella sola Longanesi sono usciti, sugli aspetti scientifici, tecnologici e umanistici, una quantità di libri su *Star Trek* e oltre: Thomas Richards, *Il mondo di* Star Trek, trad. it. di L. Sosio, Longanesi, Milano 1998; Susan Jenkins e Robert Jenkins, *Segni di vita. La biologia di* Star Trek, trad. it. di L. Sosio, Longanesi, Milano 1999; Lois H. Gresh e Robert Weinberg, *I computer di* Star Trek, trad. it. di L. Sosio, Longanesi, Milano 2001; Lawrence M. Krauss, *Oltre Star Trek,* trad. it. di L. Sosio, Longanesi, Milano 2002; Judith Barad con Ed Robertson, *L'etica di* Star Trek, trad. it. di L. Sosio, Longanesi, Milano 2003 ↲

)

Entrambi questi libri sono di Roger Highfield, The Physics of Christmas: from the aerodynamics of reindeer to the thermodynamics of turkey, Little, Brown, Boston 1998; e La scienza di Harry Potter: come funziona veramente la magia, trad. it. di LA. Dalla Fontana, Mondadori, Milano 2003. ↩

·)

La prospettiva, se non la promessa, di un seguito era già stata scherzosamente lasciata intravedere da Krauss nell'epilogo della prima edizione, quando consigliò ai lettori: «Se mi sono lasciato sfuggire qualcuno fra gli errori o gli argomenti di fisica che vi sembrano più importanti o significativi, mandate i vostri suggerimenti al mio editore. Se ce ne saranno abbastanza, anche noi, come *Star Trek,* potremo progettare un seguito. Ho già trovato il titolo: *La fisica di Star Trek II: L'ira di Krauss». (N.d.T.)* ↲

)

Michael Okuda, Denise Okuda e Debbie Mirak, *The Star Trek Enciclopedia,* Pocket Books, New York 1994. ↩

)
Rick Sternbach e Michael Okuda, *Star Trek: The Next Generation Technical Manual,* Pocket Books, New York 1991. ↩

)

Un *grappler* era un'asta metallica fornita di una sorta di pinza terminale, la quale poteva essere lanciata nello spazio da un'astronave per raccogliere oggetti nello spazio; a questo punto la pinza veniva bloccata sull'oggetto magneticamente. *(N.d.T.)* ↵

)

Cit. in Albert Einstein: Philosopher Scientist, a cura di Paul Schilpp, Tudor, New York 1957 (trad. it. di A. Gamba, Albert Einstein scienziato e filosofo. Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti, Boringhieri, Torino 1958). ↩

)
Rick Sternbach e Michael Okuda, *Star Trek: The Next Generation Technical Manual,* Pocket Books, New York 1991. ↩

0)
Ibid. ل

1)
Michael Okuda, Denise Okuda e Debbie Mirak, *The Star Trek Encyclopedia,* Pocket Books, New York 1994. ↩

2)

Il termine *entanglement* fu usato per la prima volta da Erwin Schr ö dinger nel 1935 nella sua recensione del famoso articolo di Einstein, Podol'skij e Rosen *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?* (trad. it. di G. Longo, in Albert Einstein, *Opere scelte,* a c. di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988). Anche se in italiano sono state suggerite più o meno timidamente come equivalenti del termine varie soluzioni, fra cui (stretta) correlazione, legame (indissolubile), intreccio ecc., ha finito per entrare direttamente nell'uso come termine tecnico il vocabolo inglese *entanglement.* Sul concetto si può vedere Amir D. Aczel, *Entanglement. Il più grande mistero della fisica,* trad. it. di M. Pagani, Raffaello Cortina, Milano 2004. *(N.d.T.)* ↵

3)

Cave è un acronimo per *Cave Automatic Virtual Environment.* Questa «caverna» è una sorta di ambiente virtuale. Essa è in realtà una sorta di piccola stanza cubica sulle cui pareti, pavimento e soffitto bianchi vengono proiettate delle immagini che, grazie a specchi, occhiali per vedere in 3D e sensori elettromagnetici, creano la sensazione di uno spazio tridimensionale, in cui tutti gli oggetti presenti sono virtuali. *(N.d.T.)* ↲

4)
Recensione di Philip Morrison, in *Scientific American,* novembre 1994, del libro di B. H ö lldobler ed Edmund O . Wilson, *Journey to the Ants: A Story of Scientific Explorations,* Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1994. ↲

5)

Francis Crick, *Life Itself* , Simon and Schuster, New York 1981 (trad. it. di B. Vitale, *L'origine della vita,* Garzanti, Milano 1983). [La teoria della «panspermia guidata» di Crick si ispira a una teoria anteriore, quella della panspermia di Sva nt e Arrhenius (1907), secondo il quale la vita sulla Terra si sarebbe sviluppata a partire da microrganismi arrivati dallo spazio. *(N. d. T.)]* ↵

6)

L'astrofisico, fisico delle particelle e cosmologo Michael Turner. Vedi Lawrence Krauss, *Il mistero della massa mancante nell'universo,* trad. it. di L. Sosio, Raffaello Cortina Editore, Milano 2000, pp. 141, 1 46, 307. *(N.d.T.)* ↲

7) Bernard M. Oliver, The Search of Extraterrestrial Life, in Engineering and Science, dicembre 1974. ↩

8)

Per una rassegna esauriente di quest'argomento, mi permetto di rimandare al mio libro *The Fifth Essence: The Search far Dark Matter in the Universe,* Basic Books, New York 1989 (trad. it. di L. Sosio, *Il cuore oscuro dell'universo. Alla ricerca della «quinta essenza»,* Mondadori, Milano 1990). ↲

9)

La parola *«anyon»* è stata tradotta nell'episodio di Star Trek *Un'altra dimensione* col termine anioni. Questa scelta risulta però infelice, in quanto il termine «anione» ha già un preciso significato scientifico. Gli anioni sono infatti gli ioni negativi, e si chiamano così perché, quando sono sottoposti a un campo elettrico, migrano verso l'anodo (in contrapposizione ai cationi, ioni positivi, che migrano verso il catodo). Il termine *anyon* = *any* + *on,* come si dice più avanti nel testo, è stato invece introdotto da Frank Wilczek per indicare una particella il cui spin non è più quantizzato e può quindi assumere qualunque valore, in contrapposizione al dualismo fra fermioni (particelle a spin semintero) e bosoni (particelle a spin intero). Mi sarebbe piaciuto tradurre *anyon* con *qualunquone* , ma, rispettando la scelta fatta nell'edizione italiana di *Star Trek,* ho adottato la grafia, per quanto discutibile, di anyoni, per evitare la confusione con gli anioni. *(N.d.T.)* ↲

0)

John Scott Russell, Report of the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, John Murray, London 1844. ↩

1)

Raymond Davis jr. (1914-2006), dell'Università della Pennsylvania a Fildelfia, e Masatoshi Koshiba (n. 1926), dell'Università di Tokyo, si divisero metà del premio Nobel per la fisica del 2002, «per aver dato contributi pionieristici all'astrofisica, particolarmente con la scoperta dei neutrini cosmici»; l'altra metà fu assegnata al genovese Riccardo Giacconi (n. 1931), delle Associates Universities, In c., di Washington, D.C., «per aver dato contributi pionieristici all'astrof i sica che hanno condotto alla scoperta di sorgenti cosmiche di raggi x». *(N.d.T.)* ↲